

В.С. Милютин

**ИСПЫТАНИЯ СВАРОЧНЫХ
СВОЙСТВ ОБОРУДОВАНИЯ
ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ**

Екатеринбург

2019

Научный редактор – канд. техн. наук, доцент кафедры «Технология сварочного производства» УрФУ А.В. Матушкин

Милютин В.С.

М60 Испытания сварочных свойств оборудования для дуговой сварки: / В.С. Милютин — Екатеринбург, 2019. —466 с.

В работе дано определение понятия и выполнена классификация сварочных свойств источников питания и другого оборудования для дуговой сварки. Разработаны методики объективной экспериментальной оценки непосредственных критериев для каждого свойства. Отобраны косвенные критерии для оценки сварочных свойств по паспортным техническим характеристикам оборудования. Описаны приемы совершенствования сварочных свойств с примерами как конвенционального, так и современного оборудования с микропроцессорным управлением. Охарактеризована исследовательская аппаратура, в том числе для автоматизации испытаний.

Работа адресована специалистам сварочного производства — производителям и пользователям оборудования для дуговой сварки, и поможет им при проектировании и мотивированном выборе источников питания, аппаратов для механизированной или автоматической сварки и комплектных установок для специальных методов сварки. Благодаря вводным подразделам к каждому разделу может быть полезна и другим специалистам, работающим в области производства, сертификации и аттестации сварочного оборудования.

Объем 466 стр., 205 рис., 63 табл., 239 наим. библ.

Условные обозначения

- C, L — электрическая емкость, индуктивность.
 d_3, d_k — диаметр электрода (электродной проволоки), капли.
 e, g, h — ширина, выпуклость шва, глубина проплавления.
 f, f_n — частота переменного тока, импульсов.
 f_k, f_{kk} — частота переноса капель, коротких замыканий каплями.
 $F_n, F_{пр}, F_{ш}$ — площадь наплавки, проплавления, шва.
 i_2, I_2, I_{2m} — мгновенное, действующее, амплитудное значение вторичного тока трансформатора.
 I_d — среднее значение тока в интервале горения дуги.
 $I_{ду}, I_{ку}, I_{сву}$ — установившееся (настроенное) значение тока дуги, короткого замыкания, сварочного.
 I_3, U_3, t_3 — ток, напряжение, время повторного зажигания дуги.
 I_n, I_n, I_6 — ток импульса, паузы, базовый.
 $I_k, I_{кп}$ — среднее и пиковое значение тока короткого замыкания.
 $I_{ном}, U_{ном}$ — номинальные ток и напряжение источника.
 I_p — ток условной рабочей нагрузки.
 $I_{св}$ — среднее значение сварочного тока.
 $I_{свmin}, U_{свmin}$ — минимально возможные сварочные ток и напряжение.
 I_{min}, I_{max} — минимальный и максимальный ток источника.
 k_p — коэффициент потерь на угар и разбрызгивание.
 $k_{рн}$ — коэффициент усиления регулятора напряжения.
 $k_{ст}, k_{сн}$ — коэффициент саморегулирования по току, напряжению.
 k_v, σ — коэффициент вариации и среднеквадратическое отклонение.
 l_d — длина дуги.
 $l_{днmax}, l_{др}$ — предельная начальная, разрывная длина дуги.
 m_k — масса капли электродного металла.
 $n_{обр}$ — частота обрывов дуги.
 P_d, P_n — активная мощность дуги, источника.
 $R_d, R_n, R_6, R_{вн}$ — активное сопротивление дуги, источника, балластного реостата, внешней сварочной цепи.
 $t_d, t_k, t_x, t_{св}$ — длительность горения дуги, интервалов короткого замыкания, холостого хода, сварки.
 t_n, t_n — длительность импульса, паузы.
 t_{kk}, T_{kk} — длительность, интервал коротких замыканий каплями.
 T, T_n — длительность периода, цикла.
 u_2, U_2, U_{2m} — мгновенное, действующее, амплитудное значение вторичного напряжения трансформатора.
 $U_{вн}, U_{проб}$ — напряжение высоковольтного источника, пробоя.
 U_d — среднее значение напряжения дуги.
 U_n — напряжение источника.
 $U_{ка}, U_{ст}$ — напряжение катодной и анодной области, столба дуги.

U_p — напряжение условной рабочей нагрузки.
 U_x — напряжение холостого хода источника.
 $V_{под}, V_{пл}$ — скорость подачи, плавления электрода.
 $V_{св}$ — скорость сварки.
 $X_{и}, X_L$ — индуктивное сопротивление источника, дросселя.
 $Z_{и}$ — полное сопротивление источника.
 $\epsilon_{ст}$ — градиент потенциала столба дуги.
 $\rho_d, \rho_{и}$ — дифференциальное сопротивление дуги, источника.

Английские аббревиатуры

AC — *Alternating Current* (переменный ток).
AWS — *American Welding Society* (Американское сварочное общество).
CC — *Constant Current* (падающая внешняя характеристика).
CV — *Constant Voltage* (жесткая внешняя характеристика).
DC — *Direct Current* (постоянный по направлению ток).
DCEN — *Direct Current Electrode Negative* (дуга постоянного тока прямой полярности).
DCEP — *Direct Current Electrode Positive* (дуга постоянного тока обратной полярности).
FCAW — *Flux Cored Arc Welding* (сварка порошковой проволокой).
GMAW — *Gas Metal Arc Welding* = *MIG / MAG* (сварка в защитном газе плавящимся электродом).
GTAW — *Gas Tungsten Arc Welding* = *TIG* (сварка неплавящимся электродом в инертном газе).
HF — *High Frequency* (высокочастотный источник).
IIW — *International Institute of Welding* (МИС — Международный институт сварки).
MAG — *Metal Active Gas welding* (сварка в активном газе плавящимся электродом).
MIG — *Metal Inert Gas welding* (сварка в инертном газе плавящимся электродом).
MMA — *Manual Metal Arc welding* (ручная сварка покрытым электродом).
SAW — *Submerged Arc Welding* (сварка под флюсом).

Автор за помощь в сборе и обработке научной и технической информации по тематике работы благодарит специалистов сварочного производства Катаева Р.Ф., Морозова А.А., Полухина А.В., Радусева В.Б., Разикова Н.М., Сивоплясова А.Г. и многих других.

ВВЕДЕНИЕ

Сварочное свойство оборудования как характеристика его технологической пригодности

В сварочном производстве возникло новое научное направление — изучение и совершенствование сварочных свойств дуги, материалов, и оборудования. Пригодность оборудования для выполнения заданной сварочной технологии определяется конкретным набором сварочных свойств с конкретными числовыми значениями критериев для каждого из этих свойств. Поэтому конечной целью нового научного направления в области оборудования является разработка систем проектирования и выбора источников питания и технологического оборудования с назначенными параметрами сварочных свойств. А ближайшей целью, в том числе и целью данной работы, принято создание методики испытаний для объективной оценки сварочных свойств этих объектов.

Термин «сварочное свойство» применительно к оборудованию для дуговой сварки введен сравнительно недавно. Но уже с первых лет использования дуги для сварки совершенствование конструкции и параметров источников питания и другого сварочного оборудования имело целью расширение технологических возможностей сварки. А при испытании готового оборудования обычно решается вопрос о его функциональной пригодности — способно ли оно обеспечить эффективный технологический процесс с высокими производительностью и качеством.

Источники питания — главный объект совершенствования сварочных свойств. История появления и развития источников в плане их пригодности для дуговой сварки может быть представлена такой последовательностью:

- коллекторные генераторы,
- трансформаторы с нормальным и увеличенным рассеянием,
- выпрямители с диодными вентильными блоками,
- тиристорные выпрямители и трансформаторы,
- вентильные генераторы,
- инверторные источники,
- чопперы — транзисторные постовые регуляторы.

Коллекторные генераторы — это первые источники питания постоянного тока, специально предназначенные для дуговой сварки. Они быстро вытеснили из производственного использования приспособляемые для этих целей источники другого или общего назначения, каким была, например, мощная батарея свинцово-кислотных аккумуляторов, позволившая российскому изобретателю Н.Н. Бенардосу открыть в 1889 г. эру дуговой сварки. И уже первый сварочный генератор посто-

янного тока, разработанный и описанный в 1892 г. [1] российским инженером Н.Г. Славяновым, был дополнен балластным реостатом. Такой реостат кроме настройки тока обеспечивал еще и формирование падающей внешней вольт-амперной характеристики. А это, как было теоретически обосновано позже немецким физиком В. Кауфманом [2], способствует надежному зажиганию и устойчивому горению дуги.

Дуга переменного тока обрела статус эффективного технологического инструмента позже, хотя первые исследования ее электрических свойств, описанные акад. В.Ф. Миткевичем, относятся к 1905 г [3]. Несмотря на относительную простоту и дешевизну источника — сварочного трансформатора — «дорогу переменному току в сварку», по образному выражению проф. Г.И. Лескова [4], удалось открыть только после преодоления главного недостатка — низкой устойчивости сварочной дуги переменного тока. Успешное внедрение в сварочную технологию дуги переменного тока в 30–50-е годы прошлого века стало возможным именно благодаря теоретическому осмыслению электрических процессов при переходе тока через нуль. Теория сварочной дуги переменного тока, разработанная в трудах Дж. Каса, Б.Е. Патона, В.К. Лебедева и Г.И. Лескова [5, 6, 7], в том числе решение проблемы ее устойчивости введением в сварочную цепь индуктивности, обеспечила научный подход к проектированию сварочных трансформаторов.

Диодные выпрямители, появившиеся в 50-х годах, обладали важным достоинством статического преобразования сетевого трехфазного тока в постоянный сварочный. Но по сварочным свойствам они уступали последним поколениям вращающихся машин — генераторов и преобразователей. Затем выпрямители стали комплектовать устройствами, улучшающими сварочные свойства — дросселем, цепью подпитки, измерительными приборами и дистанционным регулятором — что и решило в их пользу спор с вращающимися машинами, эксплуатирующимися в цеховых условиях. Среди этих устройств особенно эффективным оказался дроссель насыщения, но к настоящему времени дроссельные выпрямители полностью вытеснены тиристорными и инверторными.

Тиристоры — неполностью управляемые силовые вентили, вошедшие в сварочную технику в 70-е годы — значительно подняли уровень сварочных свойств источников. С их помощью плавно настраивается режим сварки и стабилизируются ток и напряжение, формируются любые внешние характеристики, в том числе универсальные, выполняется дистанционное и программное управление процессом и т.д.

Вентильные генераторы, представляющие собой комбинацию генератора переменного тока повышенной частоты (200–1000 Гц) и выпрямительного блока, проще и надежней коллекторных. Они обладают более высоким быстродействием системы управления, а поэтому и бо-

более высокими сварочными свойствами в сравнении с коллекторными. Это и предопределило практически полную замену коллекторных генераторов на вентильные в составе отечественных агрегатов с двигателями внутреннего сгорания.

Инверторные источники благодаря высокочастотной промежуточной стадии преобразования (20–100 кГц) имеют замечательные сварочные свойства, обеспечивающие даже управление переносом по отдельности каждой капли электродного металла. В перспективе большинство сварочных источников будут инверторными.

Транзисторный постовой регулятор — чоппер — преобразует постоянный ток неуправляемого выпрямителя или генератора в постоянный же, но повышенный ток сварочного поста. Чоппер так же как и инвертор выполняет промежуточное высокочастотное преобразование, и имеет высокие сварочные свойства.

После появления инверторных и чопперных силовых преобразователей остальные, более простые и менее эффективные виды источников стали называть конвенциональными, т.е. традиционными.

Технологическое сварочное оборудование — другой важный объект совершенствования сварочных свойств. Это направление расширения возможностей дуговой сварки развивалось в таком порядке:

- автоматы для сварки под флюсом и в защитных газах,
- шланговые полуавтоматы для сварки в защитных газах,
- специализированные по методам сварки установки,
- установки с жестким программным управлением,
- установки с микропроцессорным управлением.

В аппаратах для автоматической сварки первоначально устойчивое горение дуги поддерживал автоматический регулятор напряжения дуги, воздействующий на скорость подачи электродной проволоки. Затем было выяснено, что при автоматической сварке тонкой проволокой, а также при механизированной сварке шланговым полуавтоматом можно ограничиться использованием более простого привода с постоянной скоростью подачи в расчете на эффект саморегулирования дуги. Но высокий уровень сварочных свойств система саморегулирования обеспечивает только при выполнении ряда условий: диаметр проволоки не более 4–5 мм, наклон внешней характеристики источника не круче 0,1 В/А, индуктивность дросселя в сварочной цепи от 0,1 до 1,7 мГн в зависимости от диаметра электрода. Аппараты для автоматической сварки кроме того должны иметь стабильную скорость сварочного перемещения.

К оборудованию для специальных методов сварки (аргонодуговая, плазменная и др.) предъявляется ряд специфических требований: бесконтактное и мягкое контактное зажигание, высокая устойчивость дуги как постоянного, так и переменного тока, плавный спад тока для заварки кратера, питание дежурной дуги и т.д. Поэтому при выяснении

функциональной пригодности такого оборудования необходимо убедиться в высоком качестве всего комплекса сварочных свойств. Например, при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом алюминия — это зажигание высоковольтным разрядом, импульсная стабилизация дуги переменного тока, баланс токов и длительностей полупериодов: обратной полярности — для катодной очистки поверхности изделия, прямой — для полного проплавления изделия, и т.д.

Система автоматического программного управления должна обеспечить технологически обоснованную последовательность и продолжительность работы всех исполнительных устройств, входящих в состав сварочной установки. Например, в универсальной установке для плазменной и аргонодуговой сварки на постоянном токе к таким устройствам относятся: основной источник питания, источник дежурной дуги, возбудитель, газовый клапан и привод подачи присадочной проволоки. А при автоматической сварке к ним добавляются еще привод перемещения автомата и (или) привод вращения изделия, возможно, также приводы стабилизации длины дуги и слежения по стыку соединяемых деталей. Другие наборы исполнительных устройств — при ручной, механизированной и автоматической сварке плавящимся электродом. Более сложные циклические системы (с частотой от 0,1 до 200 Гц) обеспечивают управление формированием шва (сварка пульсирующей дугой) и управление переносом электродного металла (например, импульсно-дуговая сварка). Начиная с первых попыток внедрения систем программного управления в сварке, наблюдался непрерывный прогресс элементной базы схем управления — от дискретных элементов автоматики к печатным платам, логическим элементам и интегральным микросхемам. Но принцип задания и настройки временных интервалов всегда оставался одинаковым — благодаря отсчету времени в RC -цепочке, где электрические процессы зарядки-разрядки конденсатора на резистор во времени имеют экспоненциальный, т.е. неравномерный характер.

Микропроцессор как устройство цифровой автоматики обеспечивает гораздо большую равномерность настройки длительностей и высокую точность программного управления как источниками, так и приводами. Здесь легко реализуется и принцип гибкого управления, позволяющий корректировать параметры цикла по сигналам обратных связей. С помощью микропроцессора выполняются все приемы управления инверторными, чопперными и некоторыми тиристорными источниками — плавная настройка и стабилизация электрических параметров режима, формирование любых типов внешних характеристик, в том числе ломаных комбинированных. Микропроцессор задействован в реализации большинства специальных функций (горячий пуск, плавный разгон привода и др.). В современном сварочном оборудовании именно благодаря микропроцессорам решаются наиболее трудные задачи — управление переносом электродного металла и формированием шва.

Термин «специальная функция» появился в начале 80-х годов для обозначения конструкционных, схемных и программных решений, при-

дающих сварочному оборудованию новые свойства и расширяющих технологические возможности источников и других устройств. Первоначально они фигурировали в выставочных проспектах, а также в руководствах по эксплуатации и в сервисной документации оборудования иностранных фирм, и поэтому более известны по их англоязычному названию.

При ручной сварке это — горячий пуск (*hot start*), защита от прилипания (*antistick*), форсирование дуги (*arcforcing*), ограничение напряжения холостого хода до и после сварки (*voltage reduction*), предварительная настройка двух режимов (*minilog*), быстрый обрыв дуги (*broken arc*), оптимизация характеристик источника в зависимости от указанного типа электродного покрытия (*rutil-basic-cellulose*).

При механизированной и автоматической сварке плавящимся электродом это — сложная циклограмма с подачей газа до и после сварки, плавным нарастанием скорости подачи проволоки в начале и плавным замедлением в конце сварки. К специальным функциям относятся также растяжка дуги, синергетическая настройка режима (*synergic control*), программирование капельного переноса при сварке в аргоне (*power wave*), двойное модулирование тока при сварке алюминия (*double pulse*), вычисление истинного значения напряжения дуги (*true arc voltage*), сохранение, запоминание и чтение нескольких заимствованных и подобранных режимов (*hold-mem-rem*).

При аргонодуговой сварке неплавящимся электродом это — выдержка при подаче газа в начале (*pregas*) и конце (*postgas*) сварки, мягкий пуск (*soft start, cold start*), зажигание дуги осциллятором (*HF*), плавное нарастание (*up slope*) и спад (*down slope*) тока, двухтактный (*2-step*) и четырехтактный (*4-step*) циклы сварки, пульсирующая дуга (*pulse*), разнополярные прямоугольные импульсы (*square wave*), согласование полярностей дуги (*balance*).

Ведущие производители сварочного оборудования совершенствуют сварочные свойства систематически, постепенно обновляя и накапливая библиотеки синергетических программ, из которых сварщик выбирает необходимые в зависимости от способа сварки, характера переноса, толщины и типа свариваемого металла и т.д. Заметим, что в современном оборудовании отечественных фирм многие из названных функций также внедрены, хотя и с некоторым отставанием.

Разработка методик испытаний специально для проверки функциональной пригодности источников питания началась в нашей стране только в 70-е годы прошлого века. Такая задержка в формулировании технологических характеристик источников относительно фактических сроков создания этих источников объясняется различающимися подходами к определению роли дуги и источника при сварке. Дуга как своеобразный технологический инструмент оказывает *непосредственное* воздействие на различные компоненты и фазы технологического процесса (нагрев и плавление металла, перенос электродного металла, образование сварочной ванны и т.д.). Это вызывает необходимость тща-

тельного изучения сварочно-технологических свойств дуги, что нашло отражение даже в названиях соответствующих монографий [8, 9, 10]. А источник питания, как и технологическое оборудование, свое воздействие на конечный результат — сварной шов — оказывают *опосредованно* — через сварочную дугу. Разумеется, это не умаляет необходимости анализировать влияние источника на результат сварки. Наоборот, это требует комплексного изучения характеристик и свойств всех звеньев единой энергетической системы «источник–дуга–шов».

Еще одна причина прошлого пренебрежения сварочными свойствами оборудования кроется в несправедливой оценке роли оборудования среди других факторов, влияющих на качество сварки. Традиционно было принято располагать эти факторы в следующем порядке: квалификация сварщика, тип и качество сварочных материалов, совершенство технологии и, наконец, свойства оборудования. Упрощенно такую последовательность можно признать верной, хотя в отдельных конкретных случаях порядок может быть и другим. Например, при роботизированной сварке на первое место выходит именно оборудование. Но даже и при традиционном распределении ролей важность совершенствования сварочных свойств источника, как и другого сварочного оборудования, неоспорима, поскольку «плохой» источник может свести на нет достоинства остальных компонентов сварочного процесса.

Толчком к четкому формулированию понятия «сварочное свойство» послужила разработка стандарта по оценке функциональной пригодности источников для сварки. С этой целью в Советском Союзе и странах СЭВ в конце 70-х годов проводился опрос производителей и пользователей сварочного оборудования, которые выделили наиболее существенные сварочные свойства и критерии для их оценки [11]. На этом основании совместно Институт электросварки им. Е.О.Патона и ВНИИ электросварочного оборудования впервые разработали стандарт на методы испытания сварочных свойств источников для ручной и механизированной сварки — ГОСТ 25616-83 [12]. Правда, в самом ГОСТе термин «сварочное свойство» не был сформулирован, но использовался термин «показатель сварочного свойства». При ручной сварке покрытым электродом к таковым отнесли начальное зажигание дуги, стабильность процесса сварки, разбрызгивание металла, качество формирования шва и эластичность дуги. А при механизированной сварке шланговым полуавтоматом это были надежность установления процесса сварки, потери металла и качество формирования шва.

Определение понятия и классификация сварочных свойств

В технологическом процессе дуговой сварки источник выполняет следующие основные функции (табл. В.1):

- обеспечивает зажигание дуги,
- поддерживает устойчивое горение дуги,
- используется для настройки режима сварки.

Кроме того, источник, опосредованно через дугу воздействуя на технологический процесс, выполняет дополнительные функции:

- способствует благоприятному переносу электродного металла,
- способствует качественному формированию сварного шва.

В зависимости от устройства и электрических характеристик источника названные функции будут им выполняться хорошо или плохо. Поэтому при разработке и выборе источника важно знать, все ли функции он выполняет качественно, обеспечивает ли внедрение эффективной технологии, как воздействует на качество сварки — иными словами, какими он обладает сварочными свойствами. При этом следует учитывать, что кроме источника на производительность и качество сварки оказывают влияние квалификация сварщика, свойства сварочных материалов, параметры дуги и технологического процесса в целом, а также внешние условия сварки. Поэтому испытания и оценку сварочных свойств следует выполнять при прочих благоприятных или четко регламентированных стандартом условиях.

Сварочное свойство источника — это определяемое его электрическими характеристиками качество выполнения одной из функций, связанных с обеспечением заданной технологии сварки.

Понятие «сварочное свойство технологического оборудования» (шлангового полуавтомата, аппарата для сварки под флюсом, установки для аргонодуговой сварки и т.д.) еще не отработано с такой же степенью подробности, как для источников. Однако ясно, что оно должно характеризовать качество выполнения этим оборудованием функций, связанных с обеспечением сварочного процесса — подача электрода, сварочное перемещение, программное управление циклом сварки и т.д.

Классификация сварочных свойств источников выполнена ниже в порядке перечисления соответствующих им функций (табл. В.1).

Надежность зажигания дуги является важным свойством источника, поскольку влияет на качество начального участка шва, а при сварке короткими швами — и на производительность. В специальной литературе используют как полные синонимы термины «зажигание» и «возбуждение». Будем пользоваться первым из них, поскольку он приводится в ГОСТах на все типы источников и отдельные типы технологического оборудования в контексте «...проверка надежности зажигания ... дуги». В зависимости от вида физических процессов, вызывающих появление дуги, различают:

- зажигание коротким замыканием электрода на изделие (разд. 1),
- установление дуги в результате нескольких касаний и перегораний контакта между электродной проволокой и изделием (разд. 2),
- зажигание пробоем промежутка между электродом и изделием высоковольтным разрядом (разд. 3).

Устойчивость процесса сварки — важнейшая характеристика системы «источник–дуга–шов», в которой происходит последовательное преобразование энергии, приводящее к конечной цели сварочного процесса — получению сварного соединения. Удовлетворительное обеспечение этого сварочного свойства является условием самого существования сварочной дуги, а его высокий уровень повышает вероятность получения качественного шва. В теории автоматического управления под устойчивостью понимают способность энергетической системы после приложения возмущающего или управляющего воздействия приходить в установившееся состояние, т.е. такое, которое характеризуется длительным постоянством ее энергетических параметров.

Устойчивость оценивается в несколько этапов. Прежде всего, имеет значение принципиальная (или статическая) устойчивость энергетической системы «источник–дуга», т.е. способность источника поддерживать непрерывное горение дуги хотя бы при малых возмущающих воздействиях — без обрывов дуги и длительных замыканий электродом на ванну. С допустимой точностью такие требования при ручной сварке покрытым электродом может выполнить квалифицированный сварщик в наиболее благоприятных условиях сварки. Такие условия удастся обеспечить, например, при сварке электродами с рутиловым покрытием, на оптимальном режиме, без поперечных колебаний электрода, в нижнем пространственном положении шва.

Если обеспечена устойчивость «в малом», то на следующем этапе оценивают устойчивость «в большом», т.е. при значительных возмущениях. Наиболее распространенные и значительные возмущения при дуговой сварке — это колебания длины дуги, напряжения сети, скорости подачи электрода, вылета электрода из токоподвода, скорости сварки, а также состава и расхода защитной среды (газа или флюса). При этом результатом оценки является обнаружение области допустимых колебаний названных величин в пределах физических границ существования дугового процесса или в пределах технологически приемлемых параметров режима. Например, чрезмерное уменьшение длины дуги может привести к короткому замыканию электрода с ванной, а чрезмерное ее удлинение — к обрыву дуги. Эластичность дуги как характеристика пространственной устойчивости дуги при ее удлинении широко используется в практике технологической оценки сварочных материалов и технологий, но зависит и от параметров сварочного оборудования. При сварке плавящимся электродом дополнительно рассматривают устойчивость процесса при капельном переносе электродного металла, и особенно при коротких замыканиях каплями на сварочную ванну.

В зависимости от рода тока изменяются методика и критерии испытания сварочных свойств. Поэтому далее по отдельности анализируются:

- устойчивость процесса сварки на постоянном токе, т.е. с питанием от генератора, выпрямителя или инверторного источника (разд. 4);
- устойчивость процесса сварки на переменном токе, т.е. с питанием от трансформатора, в частности надежность повторных зажиганий дуги в начале каждого полупериода сварочного тока (разд. 5).

Стабильность параметров режима, оцениваемая величиной отклонений сварочных тока и напряжения, а также других параметров сварки от их средних значений, обычно проверяется после получения положительных результатов оценки устойчивости. Как видно, такая трактовка термина «стабильность» как характеристики колебаний параметров режима в устойчивом процессе отличается от термина «устойчивость» как характеристики принципиальной возможности существования сварочного дугового процесса при естественных технологических возмущениях. Стабильность параметров режима на достигнутом к настоящему времени уровне экспериментальной техники оценивают статистическими характеристиками — среднеарифметическое значение параметра, его среднеквадратическое отклонение и т.д. (разд. 6).

Эффективность настройки режима характеризует источник потому, что его регулятором обычно устанавливают один из энергетических параметров режима — ток или напряжение. Технологическое сварочное оборудование может иметь регуляторы скорости сварки, расхода газа, временных параметров сварочного цикла и т.д. Термины «настройка» и «регулирование» обычно отождествляются. С этим можно согласиться, если в обоих случаях имеется в виду предварительная (до сварки) установка задающего устройства (регулятора) в положение, обеспечивающее необходимое при сварке значение параметра режима. Наиболее эффективная настройка — точная, плавная, с широким диапазоном — выполняется в системах автоматического управления. Программное автоматическое управление обеспечивает изменение параметров в функции времени (разд. 7).

Характер переноса электродного металла бывает струйным или капельным, иногда — за счет технологических коротких замыканий капли электродного металла с ванной. Управляемый перенос имеет целью регулярное образование и измельчение капель, а также точное направление их движения в ванну. Параметры переноса зависят от электрических характеристик источника и от параметров режима, но наиболее значительно — от типа электродного металла и вида покрытия или защитного газа. Поэтому далее по отдельности анализируется:

- перенос при использовании проволочного электрода, т.е. при механизированной и автоматической сварке (разд. 8),
- перенос при ручной сварке покрытым электродом (разд. 9).

Таблица В.1.

Классификация сварочных свойств источников питания

Функция источника	Сварочное свойство	Непосредственный критерий	Косвенный критерий
Зажигание дуги	Надежность зажигания коротким замыканием	Вероятность зажигания по доле успешных попыток. Количество касаний вместе с первым успешным. Предельная начальная длина дуги.	Напряжение холостого хода. Наклон внешней характеристики.
	Надежность установления процесса при механизированной и автоматической сварке	Число коротких замыканий или обрывов. Длительность установления процесса. Интеграл действия тока короткого замыкания.	Напряжение холостого хода. Индуктивность дросселя.
	Надежность зажигания высоковольтным разрядом	Пробивное расстояние. Предельная начальная длина дуги.	Напряжение высоковольтного источника. Напряжение холостого хода основного источника
Поддержание горения дуги	Принципиальная устойчивость системы «источник–дуга»	Частота обрывов дуги.	Коэффициент устойчивости. Индуктивность дросселя.
	Устойчивость при значительных возмущениях	Разрывная длина и напряжение обрыва дуги при ее удлинении. Минимально возможные сварочный ток и напряжение	Напряжение холостого хода Тип и наклон внешней характеристики
	Устойчивость при технологических коротких замыканиях	Частота и длительность коротких замыканий каплями. Пиковый ток короткого замыкания капель.	Напряжение холостого хода и наклон внешней характеристики. Индуктивность дросселя.

Таблица В.1. (продолжение)

Функция источника	Сварочное свойство	Непосредственный критерий	Косвенный критерий
Поддержание горения дуги	Устойчивость при переменном токе	Время повторного зажигания. Скорость восстановления проводимости межэлектродного промежутка. Скорость нарастания тока после перехода через нуль.	Напряжение холостого хода. Скорость нарастания тока короткого замыкания. ЭДС и длительность действия вихревых токов.
	Стабильность параметров режима	Относительные отклонения тока и напряжения. Среднеквадратические отклонения и коэффициенты вариации тока и напряжения. Статические и динамические ошибки стабилизации по току и напряжению.	Наклон внешней характеристики. Коэффициенты пульсации тока и напряжения. Пределы колебаний напряжения холостого хода.
Настройка режима	Эффективность настройки тока и напряжения	Номинальный ток, диапазон и плавность настройки тока и напряжения. Точность настройки тока и напряжения.	Интервалы изменения напряжения холостого хода и сопротивления источника.
Воздействие на перенос	Характер переноса при механизированной и автоматической сварке	Коэффициент потерь на угар и разбрызгивание. Диаметр, масса и частота капельного переноса. Частота и длительность коротких замыканий каплями и коэффициенты их вариации. Ток короткого замыкания капель, скорость его нарастания и интеграл действия.	Диапазоны настройки напряжения при сварке короткой и длинной дугой. Индуктивность дросселя.
	Характер переноса при ручной сварке	Коэффициент потерь на угар и разбрызгивание. Длительность, частота и пиковый ток коротких замыканий каплями и коэффициенты их вариации.	Ток короткого замыкания источника. Пиковый ток процесса «нагрузка–короткое замыкание».
Воздействие на шов	Качество формирования шва	Глубина проплавления, ширина и выпуклость шва, их отклонения и коэффициенты вариации. Количество и размеры дефектов. Ровность шва.	

Качество формирования шва связано с надежностью зажигания дуги, устойчивостью процесса сварки и стабильностью его параметров, а также с характером переноса электродного металла. Несмотря на второстепенную роль сварочного оборудования в обеспечении качества сварки, это сварочное свойство необходимо определять в виде итога испытаний (разд. 10).

Критерии оценки сварочных свойств могут быть непосредственными или косвенными. Наиболее важные из них приведены в табл. В.1. Если оценка производится по качественным и количественным характеристикам дуги (в процессе сварки) или шва (после сварки), то критерий называется непосредственным или технологическим. Так, например, характер переноса электродного металла оценивают величиной коэффициента потерь на угар и разбрызгивание. Но иногда источник оценивают по его собственным электрическим параметрам, влияющим на ход и результат сварочного процесса. В этом случае говорят о косвенных критериях. К ним относится, например, скорость нарастания тока короткого замыкания при переходе через нуль у источника переменного тока, от которой зависит результат повторного зажигания дуги.

Методы оценки сварочных свойств могут быть объективными или субъективными [223]. Объективный метод предполагает количественную оценку свойства, не зависящую от квалификации и мнения сварщика. Например, разрывная длина дуги между закрепленным в штативе электродом и образцом, измеряемая в миллиметрах, может использоваться для оценки устойчивости процесса при значительных колебаниях длины дуги. Субъективный метод ограничивается только качественной оценкой каждого свойства, в лучшем случае — в баллах, которые выставляет сварщик-эксперт по результатам контрольной сварки или наплавки (табл. В.2).

Стандартные методы испытания сварочных свойств

Источники для ручной сварки покрытыми электродами в соответствии с требованиями ГОСТ 25616-83 испытывают субъективным методом по непосредственным критериям [12]. Два сварщика-испытателя на нескольких режимах выполняют наплавку валиков на пластины. В процессе наплавки или по ее результатам они с помощью табл. В.2 выставляют оценку в баллах по каждому из пяти свойств: начальное зажигание дуги (надежность зажигания), стабильность процесса сварки (устойчивость процесса и стабильность параметров режима), эластичность дуги (устойчивость при значительном удлинении), разбрызгивание металла (характер переноса электродного металла) и качество формирования

шва. В скобках приведены соответствующие названия сварочных свойств, принятые в данной работе.

Программа и условия испытания кратко заключаются в следующем:

- образцы для наплавки: из низкоуглеродистой стали, с зачищенной и обезжиренной поверхностью, с размерами 280х(60–70) мм, с толщиной, зависящей от диаметра электрода ($\varnothing 2$ –2,5 мм — толщина 3 мм, $\varnothing 2,6$ –4 мм — 6 мм, $\varnothing 5$ –6 мм — 10 мм), при температуре 25 ± 10 °;

- электроды: по ГОСТ 9466-75, прокаленные, полной длины, с зачищенным торцом, с типом покрытия, зависящим от типа источника (для источника переменного тока — с рутиловым покрытием, например марок ОЗС-4, МР-3, АНО-4; постоянного тока — преимущественно с основным покрытием, например, марок УОНИ 13/55, *LB 52U*, *OK53.70*);

- режимы наплавки: пространственное положение — нижнее или вертикальное снизу вверх, полярность дуги — в соответствии с документацией на электроды, настроенный ток — соответствует нижнему и верхнему пределам каждого из диапазонов настройки источника, диаметр электрода — соответствует настроенному току, длина дуги — приблизительно равна диаметру электрода (для унификации режимов предлагается принимать ток из табл. 4.1);

- два сварщика-испытателя: квалификации не ниже 5 разряда, с опытом эксплуатации подобных источников;

- перед зачетной наплавкой на каждом режиме каждый сварщик выполняет две пробных попытки;

- на каждом режиме каждый сварщик делает не менее двух наплавов, на каждый образец по его оси выполняется наплавка одного валика при полном расплавлении одного электрода;

- дифференцированную оценку каждого сварочного свойства выполняет каждый сварщик на каждом режиме для каждого валика в баллах от 1 до 5 в соответствии с табл. В.2, причем при наплавке в нижнем положении оцениваются все пять свойств, а в вертикальном положении только три — зажигание, стабильность и качество шва (допускается уточнение оценки до 0,5 балла);

- окончательная дифференцированная оценка каждого свойства на каждом режиме получается как средняя из оценок двух сварщиков по данному режиму, оценка в 2 и менее баллов – неудовлетворительная;

- суммарная оценка источника для каждого режима получается сложением окончательных дифференцированных оценок по всем пяти свойствам или трем (для сварки в вертикальном положении), оценка соответственно менее 15 или 9 баллов считается неудовлетворительной.

Таблица В.2.

Оценка сварочных свойств источников для ручной сварки

Сварочное свойство	Критерий оценки	Балл	Оценка свойства	Качественная и количественная характеристика свойства
Начальное зажигание дуги	Количество попыток до первой успешной	1	Плохая	Редкое зажигание или отсутствие зажигания
		2	Низкая	Зажигание после многократных соприкосновений электрода с изделием и привариваний.
		3	Удовлетворительная	Зажигание после 3–4 соприкосновений
		4	Хорошая	Зажигание после легкого движения электрода по металлу
		5	Высокая	Зажигание сразу после прикосновения электрода к изделию
Стабильность процесса сварки	Частота обрывов, вибрация дуги, звуковой эффект	1	Плохая	Неустойчивое горение дуги с частыми обрывами
		2	Низкая	Неравномерно горящая, вибрирующая дуга с обрывами
		3	Удовлетворительная	Неравномерно горящая, вибрирующая дуга без обрывов.
		4	Хорошая	Равномерно горящая дуга с незначительной вибрацией и хрустящим шумом (треск).
		5	Высокая	Спокойно, равномерно горящая дуга без вибраций (мягкое шипение).
Эластичность дуги	Разрывная длина дуги, реакция на растяжение дуги	1	Плохая	При попытке удлинения дуга сразу обрывается
		2	Низкая	Приходится постоянно поддерживать короткую дугу, при удлинении дуга обрывается
		3	Удовлетворительная	Дуга удлиняется до двойного диаметра электрода при заметном изменении интенсивности расплавления электрода
		4	Хорошая	Дуга удлиняется до тройного диаметра стержня при небольшом изменении интенсивности расплавления электрода
		5	Высокая	Дуга удлиняется до тройного (или более) диаметра электрода при неизменной интенсивности расплавления электрода

Таблица В.2. (продолжение)

Оценка сварочных свойств источников для ручной сварки

Сварочное свойство	Критерий оценки	Балл	Оценка свойства	Качественная и количественная характеристика свойства
Разбрызгивание металла	Наличие брызг на образце, размер и количество капель	1	Плохая	Очень много крупных, трудно-удаляемых брызг вблизи шва
		2	Низкая	Много крупных, трудно удаляемых брызг вблизи шва
		3	Удовлетворительная	Умеренное количество крупных и мелких, легко удаляемых брызг вблизи шва
		4	Хорошая	Мелкие брызги, равномерно распределенные вблизи шва
		5	Высокая	Мало мелких брызг на поверхности образца
Качество формирования шва	Равномерность валика по ширине и высоте, чешуйчатость, наличие шлаковых включений и пор	1	Плохая	Валик неравномерный по ширине и высоте, крупночешуйчатый, с видимыми шлаковыми включениями и порами
		2	Низкая	Валик неравномерный по ширине и высоте, крупночешуйчатый
		3	Удовлетворительная	Валик крупночешуйчатый с отдельными неровностями по высоте и превышениями по кромкам шва
		4	Хорошая	Валик мелкочешуйчатый с редкими небольшими неровностями по высоте и небольшими превышениями по кромкам шва
		5	Высокая	Валик равномерный, гладкий или мелкочешуйчатый, с плавным переходом к основному металлу

Таблица В.3.

*Оценка сварочных свойств источников
для механизированной сварки в углекислом газе*

Сварочное свойство	Критерий оценки	Балл	Оценка свойства	Качественная и количественная характеристики свойства
Надежность установления процесса	Число коротких замыканий или обрывов до установления стабильного процесса	2	Неудовлетворительная	Число коротких замыканий или обрывов более 3
		3	Удовлетворительная	Число коротких замыканий или обрывов меньше или равно 3
Потери металла	Коэффициент потерь на угар и разбрызгивание $k_p = \frac{M_p - M_n}{M_p} \times 100\%$ где M_p и M_n — масса расплавленного и наплавленного электродного металла	2	Неудовлетворительная	Коэффициент потерь для конкретного режима превышает 5–14 %
		3	Удовлетворительная	Коэффициент потерь для конкретного режима не превышает 5–14 %
Качество формирования шва	Отношение высоты валика к его ширине, чешуйчатость, наличие пор, подрезов и прожогов	2	Неудовлетворительная	Отношение высоты валика к его ширине более 0,6. Поверхность валика неровная, крупночешуйчатая с подрезами и прожогами.
		3	Удовлетворительная	Отношение 0,3-0,6. Отдельные подрезы (до 3 штук на 250 мм валика глубиной до 1 мм)
		4	Хорошая	Отношение менее 0,3. Валик гладкий или мелкочешуйчатый, без пор, подрезов и прожогов

Источники для механизированной сварки в углекислом газе испытываются в соответствии с тем же ГОСТ 25616-83 (табл. В.3). Но при этом испытании принята уже методика в основном объективной оценки по непосредственным критериям. Это означает, что оценку каждого из трех свойств (надежность установления процесса сварки, потери металла и качество формирования шва) выражают числами.

Программа и условия испытания заключаются в следующем:

- образцы для наплавки: из низкоуглеродистой стали, с зачищенной и обезжиренной поверхностью, с размерами 350х60 мм, с толщиной, зависящей от тока (табл.В.4), при температуре 25 ± 10 °;

- электродная проволока: по ГОСТ 2246-82, предназначенная для сварки низкоуглеродистых сталей, очищенная от технологической смазки и загрязнений, желательна омедненная;

- защитный газ: углекислый по ГОСТ 8050-85 не ниже 1 сорта;

- режимы наплавки принимаются из табл. В.4 (при номинальном напряжении сети — не менее четырех режимов от минимального до номинального тока источника, при пониженном на 10 % напряжении сети — один режим с номинальным током, при повышенном на 5 % напряжении сети — один режим на минимальном токе, при наплавке в вертикальном положении — режим №9);

- при наплавке в нижнем положении используется автомат для сварки в защитных газах с независимой от напряжения скоростью подачи и постоянной скоростью перемещения 25 м/час (допускается использование шлангового полуавтомата с горелкой, закрепленной на тележке, с такой же скоростью перемещения);

- наплавку в вертикальном положении выполняет сварщик-испытатель с квалификацией не ниже 5 разряда и опытом работы на полуавтоматах;

- производится автоматическая запись тока и напряжения;

- на каждом режиме выполняют не менее трех наплавов, на каждый образец по его оси наплавляют один валик;

- оценку сварочных свойств проводят для каждого режима в соответствии с табл. В.3 и В.4 (в нижнем положении — всех трех свойств, в вертикальном — только качества формирования шва);

- надежность установления процесса сварки определяют с помощью записей регистрирующего устройства по количеству коротких замыканий или обрывов до того короткого замыкания, после которого процесс продолжается без обрывов дуги (не менее пяти попыток);

- потери металла оценивают на наплавленных образцах (не менее трех) по величине коэффициента потерь на угар и разбрызгивание (методика описана в разд. 8.2.3);

Таблица В.4.

Режимы испытания источников для механизированной сварки

Номер режима	Диаметр электродной проволоки, мм	Сварочный ток, А	Напряжение сварки, В	Вылет электродной проволоки, мм	Толщина образца, мм	Расход газа, л/мин	Средний коэффициент потерь % не более
1	0,8	70	18±0,5	7	10	5	6
2	0,8	100	19±0,5	7	10	5	7
3	0,8	150	20±0,5	7	10	7	8
4	1,0	100	20±0,5	10	10	7	6
5	1,0	150	22±0,5	10	10	10	8
6	1,0	200	24±0,5	10	10	12	10
7	1,2	100	20±0,5	15	10	10	6
8	1,2	150	22±0,5	15	10	10	8
9	1,2	140	22±0,5	15	10	12	–
10	1,2	200	24±0,5	15	10	12	10
11	1,2	250	26±1,0	15	15	18	12
12	1,4	150	22±0,5	18	10	10	8
13	1,4	200	24±0,5	18	10	12	10
14	1,4	250	27±1,0	18	15	16	12
15	1,4	300	29±1,0	18	20	20	14
16	1,6	250	25±1,0	20	15	16	8
17	1,6	300	27±1,0	20	20	18	10
18	1,6	350	30±1,0	20	20	20	12
19	1,6	400	34±1,0	20	20	20	5
20	1,6	500	38±1,0	20	20	20	6

— качество формирования шва оценивается по внешнему виду валиков (не менее трех) и отношению высоты валика к ширине (среднее из трех измерений на каждом валике);

— окончательные оценки по каждому свойству определяются как среднеарифметические из выставленных по каждому валику (неудовлетворительными считаются: надежность установления процесса — если среднее количество коротких замыканий или обрывов превышает три; потери металла — если средний коэффициент потерь на угар и разбрызгивание превышает допустимое значение для соответствующего режима, указанное в табл.В.4; качество формирования шва — если средняя оценка менее 3 баллов).

Организация испытаний сварочных свойств

Для готовой продукции в зависимости от назначения различают испытания стандартные (приемо-сдаточные), типовые (один раз в два года), сертификационные, аттестационные.

Сертификационные испытания имеют целью установление соответствия сварочного оборудования требованиям нормативной документации, в частности ГОСТ 95-77 — на трансформаторы для ручной сварки, ГОСТ 7012-77 — на трансформаторы для автоматической сварки под флюсом, ГОСТ 13821-77 — на выпрямители с падающими внешними характеристиками, ГОСТ 304-82 — на генераторы постоянного тока, ГОСТ 2402-82 — на агрегаты с двигателями внутреннего сгорания, ГОСТ 18130-79 — на шланговые полуавтоматы, ГОСТ 8213-75 — на аппараты для автоматической сварки. В таком испытании по упрощенной программе при наплавке нескольких валиков на разных режимах ограничиваются субъективной оценкой со стороны сварщика только некоторых сварочных свойств.

Аттестационные испытания сварочного оборудования, применяемого при изготовлении опасных производственных объектов (котлы, трубопроводы, подъемно-транспортное оборудование и т.д.), проводятся по нормативной документации Ростехнадзора в аттестационных центрах, аккредитованных Национальным Агентством Контроля Сварки (НАКС). Целью испытаний является проверка технических характеристик сварочного оборудования, определяющих требуемое качество сварных соединений, пригодных к эксплуатации на таких объектах. Практическая часть такого испытания заключается в оценке показателей сварочных свойств оборудования по требованиям нормативной документации НАКС, в частности РД 03-614-03 [13].

Исследовательские испытания делают на стадии проектирования или перед запуском изделия в производство. Эта работа выполняется с оценкой всех или большинства сварочных свойств в широком диапазоне

режимов и условий эксплуатации. Именно по программе исследовательских испытаний проверялось большинство из нижеописанных примеров сварочного оборудования.

В 90-е годы в лаборатории сварки Уральского федерального университета (УПИ–УГТУ–УрФУ) была разработана исследовательская методика [14] объективной оценки сварочных свойств сначала источников для ручной сварки покрытым электродом, затем источников для других способов дуговой сварки и, наконец, для технологических комплексов и установок на их основе. С 1996 по 2013 г. было испытано более 100 марок оборудования отечественного и зарубежного производства практически всех известных типов — трансформаторы, выпрямители, инверторные источники, чопперы, генераторы, агрегаты, возбудители, импульсные стабилизаторы, ограничители напряжения холостого хода, шланговые полуавтоматы, аппараты для сварки под флюсом, установки для аргонодуговой сварки [15,16,17]. Как правило, при испытаниях источников для ручной сварки параллельно использовались две методики — объективная разработки УрФУ и субъективная (экспертная) в баллах по ГОСТ 25616-83. Как уже отмечалось, при испытаниях источников для механизированной сварки этот ГОСТ предписывает объективную методику, которая и применялась с усовершенствованиями в части оценки устойчивости и характеристик переноса.

Разработке объективных методик оценки сварочных свойств, а также приемам их совершенствования и посвящена эта работа.

1. НАЧАЛЬНОЕ ЗАЖИГАНИЕ ДУГИ КОРОТКИМ ЗАМЫКАНИЕМ

1.1. Феноменология зажигания коротким замыканием

Физический механизм зажигания дуги коротким замыканием поясним с помощью рис. 1.1. Электрические процессы при зажигании, поддерживаемые конвенциональным источником постоянного тока с напряжением холостого хода U_x и внутренним сопротивлением Z_n , рассмотрим последовательно — для этапа короткого замыкания электродом на изделие и этапа развития дугового разряда в межэлектродном промежутке, образовавшемся при последующем отводе электрода от изделия. Такой двухэтапный метод зажигания дуги используют, например, при ручной сварке покрытым электродом.

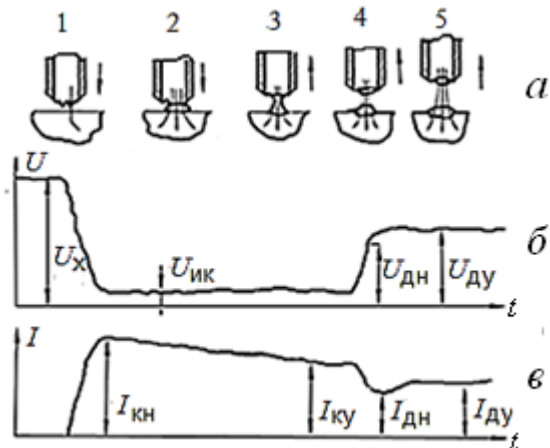


Рис. 1.1. Зажигание дуги коротким замыканием: кинограмма (а), схематичные осциллограммы напряжения (б) и тока (в)

Этап короткого замыкания начинается с момента касания электродом изделия (поз. 1). Ток протекает по ограниченной площади микроконтактов, образующихся при соприкосновении микронеровностей на поверхностях электрода и изделия. Сопротивление нагрузки, включающей в себя кроме межэлектродного контакта еще вылет электрода, сварочные провода и контакты в токоподводах, сравнительно мало и имеет порядок $R_k = 0,01-0,1$ Ом ($R_k < Z_n$). Поэтому ток короткого замыкания достигает начального значения $I_{кн}$ в несколько десятков и даже сотен ампер. Напряжение на внешних зажимах источника резко уменьшается

до сравнительно низкой величины $U_{ик}$ в несколько вольт. Дальнейшее развитие электрических процессов связано с сильным разогревом металла в микроконтактах (поз. 2). Нагрев приводит к размягчению, а возможно и расплавлению металла микроконтактов, который при продолжающемся давлении на электрод расплющивается в тонкую переемычку. Затем ток короткого замыкания быстро достигает установившегося значения $I_{кз}$ или далее изменяется менее значительно. С начала отвода электрода от изделия (поз. 3) переемычка между электродом и изделием быстро сужается и перегревается в результате уменьшения площади ее поперечного сечения и увеличения плотности тока. Длительность этапа короткого замыкания t_k в типичных условиях ручной сварки покрытым электродом составляет от 0,05 до 0,5 с и зависит от реакции и манипуляционной техники сварщика (методы «клепка», «чирканья»).

Этап развития дугового разряда начинается с момента разрушения металлической переемычки между электродом и изделием (поз. 4). На этапе развития дуги ток создается сначала движением первичных носителей, возникших в результате разрыва цепи короткого замыкания. Источником первичных электронов может служить автоэлектронная эмиссия с катода. Установлено, что на ранней стадии разведения электродов при расстоянии между ними около 10^{-9} мм даже относительно низкое напряжение источника питания в несколько десятков вольт обеспечивает высокую напряженность электрического поля около 10^{11} В/мм, достаточную для вырывания электронов из катода.

Другим возможным источником первичных электронов служит термоэлектронная эмиссия, поскольку при коротком замыкании металл на поверхности электрода нагревается до температуры 2000–4000 К. А так как пар металла, образовавшийся между электродами при такой температуре, частично ионизирован, то ионы, приближающиеся к поверхности катода, могут вызывать ионно-электронную эмиссию. Наконец, ионизированный пар, находящийся в межэлектродном промежутке, сам может проводить ток.

Затем при ускоряющемся движении первичных носителей в электрическом поле должны развиваться процессы ударной и термической ионизации. При последующем увеличении числа носителей тока возникает самостоятельный дуговой разряд, т.е. существующий без помощи других источников заряженных частиц.

Сначала длина столба дуги очень мала, поэтому начальное напряжение дуги $U_{дн}$, возникающее скачком, приблизительно равно сумме катодного и анодного падений напряжения $U_{ка}$. Ток резко снижается до начального значения тока дуги $I_{дн}$. По мере подъема электрода длина дуги увеличивается до необходимого при сварке значения (поз. 5), поэтому и напряжение дуги плавно увеличивается до установившегося

значения $U_{\text{ду}}$. Ток при этом достигает настроенного перед сваркой значения $I_{\text{ду}}$. Время этапа установления дуги $t_{\text{ду}}$ зависит от техники зажигания и реакции сварщика и в наших экспериментах составило от 0,1 до 1,2 с.

Иногда дуга зажигается и без отвода электрода, а только за счет перегорания перемычки. Такое возможно при высокой плотности тока, при заострении и слабом прижатии электрода к изделию.

На обоих этапах возможно нарушение описанного процесса, что помешает надежному зажиганию дуги. На этапе короткого замыкания его затягивание приводит к чрезмерному расплющиванию перемычки (поз. 2) и, следовательно, к снижению сопротивления и тепловыделения в контакте. Поэтому перемычка вместо разрушения может застыть, что приведет к более или менее прочному привариванию электрода к изделию. Это явление известно под названием «прилипание» или «приморозание электрода». А на этапе развития дугового разряда (поз. 5) при недостаточном разогреве электродов или слишком быстром их разведении кратковременно вспыхнувшая дуга может затем погаснуть. Это явление называют «обрыв дуги».

Технологические приемы предупреждения прилипания электрода:

- снижение длительности короткого замыкания электрода с изделием (вероятность прилипания значительно снижается при $t_{\text{к}}$ менее 0,5 с);

- снижение давления на электрод (усилие 0,5–2 Н достаточно для надежного контакта электрода с изделием);

- движение электрода по поверхности изделия (при зажигании методом «чирканья» периодически возникающие перемычки сразу же разрушаются).

Технологические приемы предупреждения обрывов дуги:

- снижение начальной длины дуги (не желательно превышение $l_{\text{дн}}$ более, чем до d_3 , хотя для отдельных марок электродов допустимо $l_{\text{дн}} = 2d_3$);

- ограничение скорости отвода электрода (при увеличении скорости до 500 мм/с не отмечено ухудшения зажигания);

- увеличение настроенного тока и уменьшение диаметра электрода (надежное зажигание отмечается при плотности тока в электроде выше 8 А/мм²);

- введение легкоионизируемых компонентов в состав электродного покрытия (лучшее зажигание обеспечивают электроды с рутиловым покрытием);

- нанесение на торец электрода вставки электропроводного и легкоионизируемого состава (например, смеси графита, железного порошка и жидкого стекла).

Как видно, большинство из вышеназванных приемов относятся к манипуляционным навыкам конкретного сварщика, другие — к режимам и материалам, и поэтому в данной работе, посвященной оборудованию, далее не рассматриваются.

Электротехнические приемы повышения надежности зажигания ниже только названы, поскольку их подробный анализ выполнен в разд. 1.3 и 1.4:

- увеличение напряжения холостого хода и снижение внутреннего сопротивления источника;
- мягкий пуск, предотвращающий только прилипание на этапе короткого замыкания;
- горячий пуск, учитывающий требования повышения надежности зажигания преимущественно на этапе установления дугового разряда;
- комбинированный пуск — сочетание мягкого и горячего пусков;
- защита от прилипания посредством прерывания короткого замыкания электрода с изделием;
- своевременное отключение устройств ограничения напряжения холостого хода до отвода электрода от изделия.

Повторное зажигание дуги необходимо после случайных обрывов дуги. Оно выполняется теми же приемами, как и начальное зажигание — касанием, чирканьем и просто приближением электрода к изделию без их непосредственного контакта. Но обычно повторное зажигание происходит в более благоприятных условиях при разогретых электроде и изделии и поэтому с большей вероятностью. Повторным зажиганием называют также технологическую операцию, выполняемую после длительного обрыва с небольшим или полным остыванием электрода. В этом случае зажиганию мешает коническая втулочка оплавленного покрытия или пленка шлака на торце электрода. Решение проблемы — в использовании покрытий и флюсов с повышенной электропроводностью при охлаждении и затвердевании шлака. Таковы покрытия, содержащие рутил TiO_2 и железный порошок. Повторные зажигания оценивают также в некоторых специальных методах сварки, где искусственно вызываются периодические обрывы или короткие замыкания.

Анализ явлений повторного зажигания при сварке на переменном токе, где надежное возобновление дуги в каждом полупериоде является необходимым условием ее устойчивости, представлен в разд. 5.

1.2. Непосредственные критерии зажигания коротким замыканием

1.2.1. Оценка зажигания без специальной аппаратуры

Простейшее испытание без применения специальной исследовательской аппаратуры заключается в визуальном фиксировании случаев возникновения дуги из большого количества попыток зажигания, например, десяти (рис. 1.2).

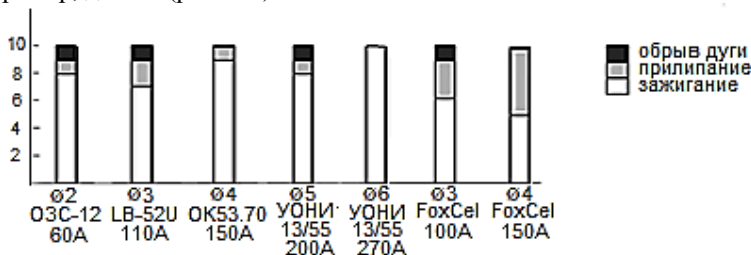


Рис. 1.2. Надежность зажигания по оценке сварщика (чопер ЧПР-315 с выпрямителем ВДМ-1201, обратная полярность)

Но исследовательское, более точное испытание сопровождаются осциллографированием сварочного тока и напряжения. Успешным зажиганием считают такое, после которого дуга непрерывно горит длительное время при настроенном токе (рис. 1.3, а). При осциллографировании для установления факта выхода на настроенный режим достаточно 1–3 с. Прилипание электрода выявляется по более или менее прочному привариванию электрода к изделию, а на осциллограмме — по короткому замыканию длительностью более 1 с (рис. 1.3, б). Обрыв дуги обнаруживается по кратковременной вспышке и последующему угасанию дуги, а при осциллографировании — по переходу от дугового разряда к холостому ходу быстрее 1 с (рис. 1.3, в).

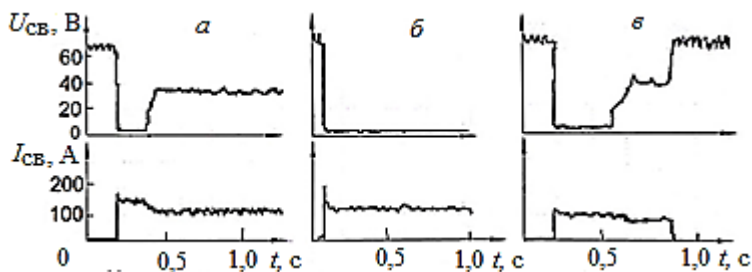


Рис. 1.3. Идентификация результата зажигания по осциллограммам: а — успешное зажигание, б — прилипание, в — обрыв (вентильный генератор ГД-1701, электрод УОНИ 13/55 Ø3 мм, $I_{св} = 100$ А, обратная полярность)

Вероятность зажигания P_3 — самый простой и широко распространенный непосредственный (технологический) критерий оценки надежности зажигания. Она определяется как доля успешных зажигания (З) в общем количестве попыток, т.е. с учетом прилипаний (П) и обрывов (О) —

$$P_3 = \frac{\Sigma Z}{\Sigma (Z + П + О)}.$$

При разработке методики эксперимента по оценке P_3 предварительно необходимо решить вопрос о достаточном количестве попыток. С этой целью на трех принципиально различных источниках — выпрямителе, агрегате и трансформаторе — выполнялись серии по 20–30 попыток зажигания дуги с использованием электродов диаметром 4 мм (рис. 1.4). Видно, что экспериментальные значения вероятности P_3 стабилизируются с увеличением количества попыток — соответственно на уровне 0,87; 0,85 и 0,67. Чтобы сократить количество экспериментов, примем допустимый интервал отклонений P_3 от вышеприведенных значений $\pm 8\%$. Границы интервалов показаны на рис. 1.4 штриховыми линиями.

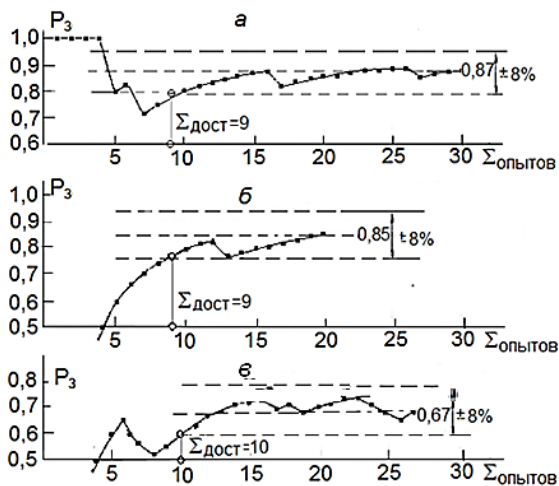


Рис. 1.4. Выбор достаточного количества опытов по зажиганию:
а — выпрямитель ВДУ-306МТ, электрод УОНИ 13/55; б — агрегат АДД-4004М, УОНИ 13/55; в — трансформатор ТДМ-401, ОЗС-4 (электроды $\varnothing 4$ мм, 150 А)

Из графиков следует, что минимально достаточное количество экспериментов составило 9–10. Эксперименты на двух других режимах — с электродами диаметром 3 и 5 мм — выявили для тех же источ-

ников достаточное количество попыток 7–10. Исключение из этой закономерности обнаружено только у источника с низкой надежностью зажигания (трансформатор ТДМ-401, электрод МР-3 Ø 3 мм, 100 А, с учетом только зажиганий с первого касания), где при $P_z = 0,40$ $\Sigma_{\text{дост}} = 13$. Поэтому принято достаточным количеством попыток $\Sigma_{\text{дост}} = 10$ для всех последующих опытов, кроме источников и режимов, отличающихся низкой вероятностью зажигания (переменный ток не более 100 А), где назначено $\Sigma_{\text{дост}} = 15$.

Условия эксперимента по определению вероятности зажигания (образцы, электроды, режимы, сварщик) унифицированы с принятыми в ГОСТ 25616-83 (см. Введение). На каждом режиме после выполнения пробных попыток сварщик делает 10 (или 15) зачетных попыток зажигания, каждый раз новым электродом, коротким замыканием с одного касания, с последующим растяжением дуги до длины не менее диаметра электрода, с длительностью горения дуги не менее 3 с. В табл. 1.1 приведены результаты типичных испытаний по вероятности зажигания.

Таблица 1.1.

Сопоставление критериев надежности зажигания коротким замыканием

Источник	Выпрямитель ВД-306Э			Выпрямитель ВДУ-306МТ			Чоппер ЧПР-315 + ВДМ-1201			Транс- форматор ТДМ-401	
Марка электрода	УОНИ 13/55									ОЗС-4	
Диаметр электрода, мм	3	4	5	3	4	5	3	4	5	3	4
Вероятность зажигания P_3	—	—	—	0,8	0,9	0,9	0,7	0,9	0,8	0,4	0,7
Количество касаний $N_{\text{кас}}$	—	—	—	1,5	1,6	1,2	1,5	1,3	1,2	3,2	2,4
Предельная начальная длина дуги $l_{\text{дугах}}$, мм	13	12	12	10	12	14	11	14	16	9*	12*

* — после нескольких касаний

Примечание: Настроенный ток — нормальный для данного электрода (табл.4.1)

Количество касаний (вместе с первым успешным) $N_{\text{кас}}$ — непосредственный критерий оценки надежности зажигания, подобный по методике испытания рассмотренной выше вероятности зажигания. Он ближе по технике манипуляций электродом к общепринятому методу зажигания в естественных условиях сварки. Действительно, если дуга

не зажглась с первого касания, то сварщик несколько раз повторяет их, пока дуга не зажжется надежно. Особенно уместен такой критерий при оценке источников переменного тока, поскольку на типичные трудности зажигания здесь накладывается возможное несовпадение момента отрыва электрода с благоприятной фазой синусоидального напряжения источника.

Предлагается следующая методика определения этого критерия. Дуга зажигается вручную в таком порядке: касание электродом изделия в течение не более 0,5 с — отрыв электрода с подъемом на высоту, приблизительно равную диаметру электрода — в случае отсутствия зажигания через 0,5–1 с повторное касание — и т.д. Визуально фиксируется номер успешного касания (такого, после которого дуга устойчиво горит в течение не менее 3 с). На одном режиме опыт повторяется не менее трех раз. В зачет идет среднеарифметическое значение. Точность определения количества касаний повышается при одновременном осциллографировании тока и напряжения (рис. 1.5). В табл. 1.1 приведены типичные результаты определения $N_{\text{кас}}$.

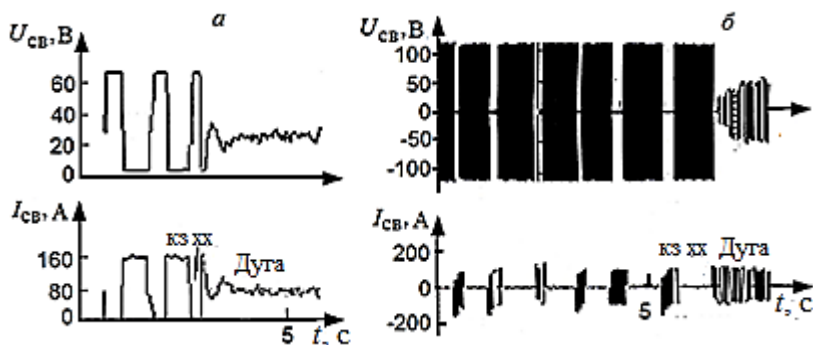


Рис. 1.5. Оценка надежности зажигания по количеству касаний: а — генератор ГД-1701, электрод УОНИ 13/55 Ø3 мм, 80 А — с 3 касания; б — трансформатор ТДМ-401, электрод ОЗС-12 Ø2 мм, 70 А — с 7 касания.

Фактически ГОСТ 25616-83 для оценки надежности зажигания использует именно этот критерий. Действительно, высший балл (5) дается в случае зажигания дуги с первого касания. Средний балл (3) соответствует зажиганию после 3–4 касаний. Низкий балл (2) отвечает случаю зажигания только после многократных касаний.

Длительность установления дугового процесса $t_{\text{уст}}$ — дополнительный непосредственный критерий надежности зажигания, близкий по технологическому содержанию и методике определения к количеству касаний $N_{\text{кас}}$. Это интервал от первого касания до надежного установления дуги. Ясно, что чем больше $N_{\text{кас}}$, тем больше и $t_{\text{уст}}$.

Описанные выше методики с определением вероятности зажигания или количества касаний, несмотря на объективный характер на последней стадии — оценки, содержат большой элемент субъективности на более ранней стадии — собственно технологического эксперимента, поскольку зависят от квалификации и старательности сварщика. Они также имеют низкий уровень дифференцированности оценок. Действительно, абсолютно высокий результат оценки в виде $P_z = 1$ при зажигании короткой дуги у нескольких источников не позволяет ранжировать их по признаку надежности зажигания, хотя их возможности по зажиганию длинной дуги могут различаться. Поэтому естественно стремление учесть при оценке надежности допустимую длину дуги в начале сварки, что и сделано ниже.

1.2.2. Оценка зажигания с фиксированием начальной длины дуги.

Такой эксперимент предлагается выполнять с использованием специального штатива (рис. 1.6) [18]. На его массивном основании 9 прижимами 11 крепится образец 10. Внутри стойки 8 по вертикали перемещается штанга 3, а по штанге — траверса 2 с закрепленным в ней электродом 1. В верхнем положении траверса удерживается действием пружины 4, опирающейся на регулировочную втулку 6. Для настройки начальной длины дуги штанга вместе с траверсой и электродом перемещается по стойке и фиксируется винтом 7. Для настройки усилия сжатия пружины втулку перемещают и фиксируют винтом 5.

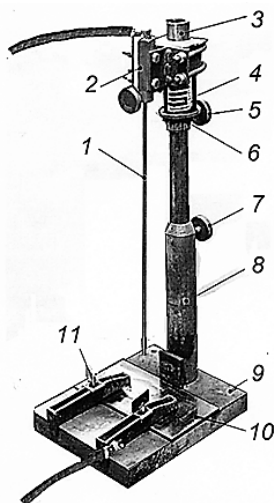


Рис. 1.6. Штатив с покрытым электродом

Для начала эксперимента при включенном источнике траверсу вручную опускают до короткого замыкания электрода с образцом. При последующем отпуске траверсы электрод отводится от образца действием пружины. При этом возникает дуга, длина которой быстро увеличивается до настроенного начального значения $l_{\text{дн}}$. Если дуга надежно зажглась и не угасла в течение 1 с, то опыт повторяют, постепенно увеличивая начальную длину. Предельной начальной длиной считается такая, при которой дуга еще зажигается в трех идентичных попытках.

В другой, более совершенной конструкции штатива используется электромагнитный привод с пневматическим тормозом. С его помощью уточнены условия эксперимента. Для малоинерционных источников длительность короткого замыкания от 0,05 до 0,5 с не влияет на результат испытания, при большей длительности несколько возрастает вероятность прилипания электрода. Изменения усилия прижатия в интервале 0,5–2 Н и скорости отвода электрода от 100 до 500 мм/с также не влияют на результат.

Полезно такой эксперимент сопровождать осциллографированием тока и напряжения. Поясним процесс начального зажигания в штативе с помощью типичной осциллограммы (рис.1.7).

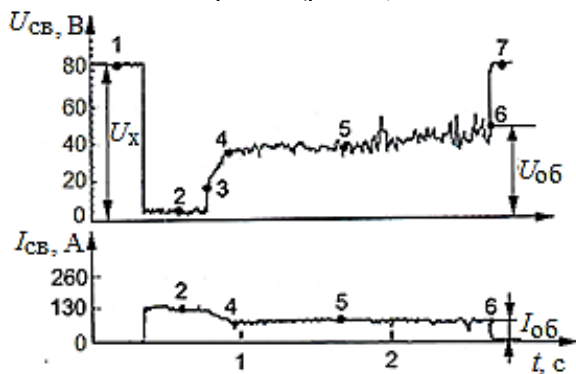


Рис. 1.7. Зажигание и обрыв дуги в штативе (генератор ГД-1701, электрод УОНИ 13/55 Ø3 мм, обратная полярность, $I_{\text{св}0} = 100$ А)

Эксперимент с использованием в качестве источника вентильного генератора начался (интервал 1) с режима холостого хода с напряжением $U_x = 85$ В. После опускания электрода до поверхности образца наступил этап короткого замыкания (2) длительностью $t_k = 0,32$ с при токе $I_k = 130$ А и напряжении $U_{\text{ик}} = 4$ В. С начала подъема электрода в течение этапа установления дуги $t_{\text{дн}} = 0,12$ с ее длина достигла начального значения $l_{\text{дн}} = 9$ мм. При этом напряжение дуги скачком приняло значение, соответствующее сумме катодного и анодного паде-

ний напряжения $U_{\text{ка}} = 18 \text{ В}$ (3), а затем по мере подъема электрода увеличилось до начального значения $U_{\text{дн}} = 36 \text{ В}$ (4). Ток на этом же этапе резко снизился до провала с $I_{\text{дн}} = 65 \text{ А}$, который затем быстро устранился. Далее следовал интервал сравнительно спокойного горения дуги (5) с постепенным ее удлинением по мере расплавления электрода. В течение этого интервала напряжение постепенно увеличивалось, а ток благодаря падающей характеристике генератора оставался на приблизительно постоянном уровне $I_{\text{д}} = 90 \text{ А}$. Наконец, при увеличении длины дуги до разрывного значения $l_{\text{др}} = 14 \text{ мм}$ произошел обрыв дуги с током $I_{\text{об}} = 80 \text{ А}$ и напряжением $U_{\text{об}} = 50 \text{ В}$ (6). Затем генератор возвратился к режиму холостого хода (7). Как видно, горение дуги со времени отрыва электрода от образца продолжалось в течение интервала $t_{\text{д}} = 1,9 \text{ с}$.

Предельная начальная длина дуги $l_{\text{днmax}}$ — непосредственный критерий объективной оценки надежности зажигания. Это длина, до которой удастся растянуть дугу в процессе начального зажигания при условии, что дуга затем не угаснет в течение 1 с. Такое время достаточно для того, чтобы сварщик в естественных условиях сварки зафиксировал факт зажигания и среагировал на него укорочением дуги до длины, необходимой при сварке.

В табл. 1.1 приведены типичные значения предельной начальной длины дуги $l_{\text{днmax}}$ в сопоставлении для различных источников и режимов. Если в соответствии с технологическими рекомендациями в установившемся процессе считать нормальной длину дуги $l_{\text{д}} = (0,5-1)d_{\text{э}}$, то, видимо, при зажигании достаточно значение $l_{\text{дн}} = 2d_{\text{э}}$. Как видно, для приведенных в табл. 1.1 источников и режимов это соотношение выдержано. Важно, что такая числовая оценка позволяет судить о степени надежности зажигания, а также сравнивать источники друг с другом.

Разрывная длина дуги $l_{\text{др}}$ — критерий оценки эластичности дуги, а не надежности зажигания. Это — расстояние между электродом и образцом в момент, предшествующий обрыву дуги, плавно удлинявшейся по мере расплавления электрода. Более подробно теоретические аспекты оценки эластичности дуги, а также экспериментальные данные по разрывной длине освещены в разд. 4.4. Поэтому здесь ограничимся только сопоставлением значений предельной начальной и разрывной длин дуги.

На рис. 1.8 приведены результаты зажигания при испытании нескольких типичных источников:

— диодный выпрямитель ВД-306Э, $U_{\text{x}} = 65-68 \text{ В}$, наклон внешней характеристики на пересечении с характеристикой условной рабочей нагрузки $\rho_{\text{нр}} = -0,55 \dots -0,25 \text{ В/А}$;

— тиристорный выпрямитель ВДУ-306МТ, напряжение холостого хода на 2 участке $U_{\text{x2}} = 55 \text{ В}$, $\rho_{\text{н2}} = -0,03 \text{ В/А}$, $\rho_{\text{н3}} = -5 \text{ В/А}$ (см. рис.1.9);

— чоппер ЧПР-315 с многопостовым выпрямителем ВДМ-1201,
 $U_x = 80 \text{ В}$, $\rho_{\text{ир}} = -1,3 \dots -0,7 \text{ В/А}$;
 — агрегат АДД-4004М с вентильным генератором ГД-4006, $U_x = 85 \text{ В}$,
 $\rho_{\text{ир}} = -0,8 \dots -0,2 \text{ В/А}$;
 — трансформатор ТДМ-401, на 1 ступени $U_{x1} = 77 \text{ В}$, $\rho_{\text{ир}} = -1,2 \dots$
 $-0,2 \text{ В/А}$; на второй ступени $U_{x2} = 58 \text{ В}$, $\rho_{\text{ир}} = -0,13 \text{ В/А}$.

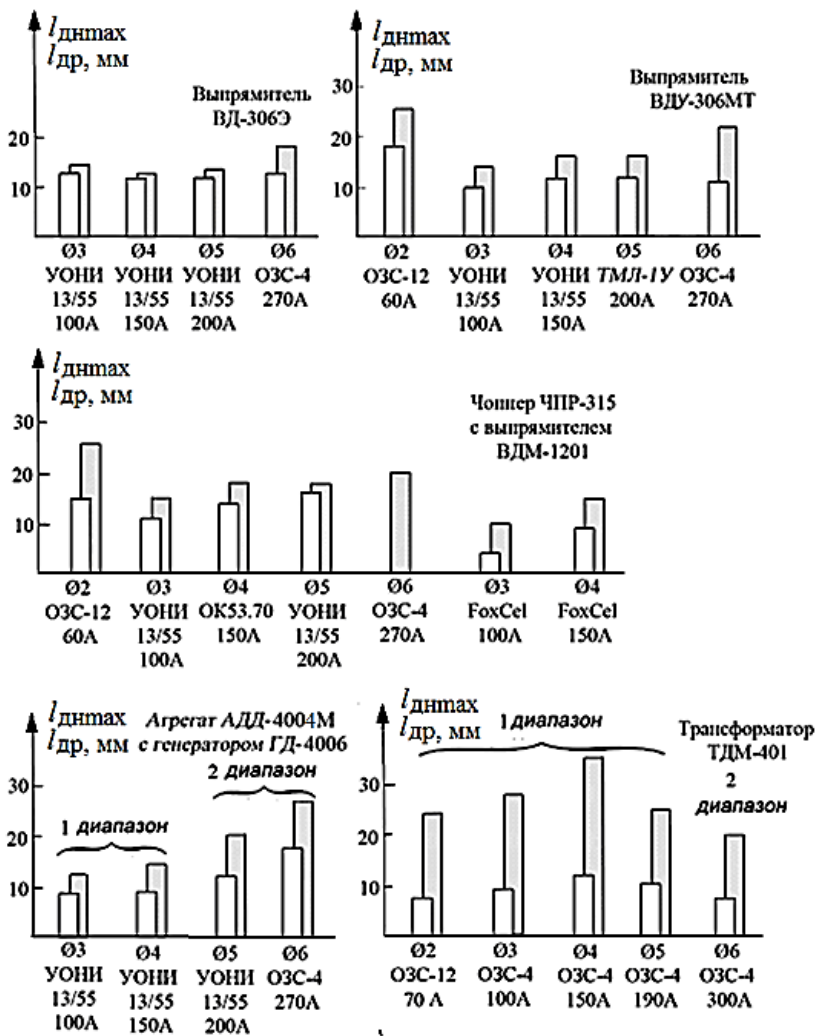


Рис. 1.8. Предельная начальная (белые столбцы) и разрывная (серые столбцы) длины дуги при зажигании в штативе

Из данных этого эксперимента, а также по более массовым результатам работы [19] установлено, что разрывная длина превышает предельную начальную у выпрямителей для электродов с покрытием:

— основным (УОНИ 13/55, ТМЛ-1У, ОК53.70, LB52U) на 1–4 мм (в среднем на 20 %);

— рутиловым (ОЗС-12, ОЗС-4, МР-3, ОК46) на 4–11 мм (30 %);

— целлюлозным (ВЦЦ-4М, Fox Cel) на 5–6 мм (40 %).

Такое сравнительно небольшое отличие наблюдается при использовании малоинерционных источников постоянного тока — выпрямителей. Несколько больше разница у вентильных генераторов, обладающих значительной электромагнитной инерцией. Абсолютно отсутствует корреляция между предельной начальной и разрывной длиной у источников переменного тока — трансформаторов. Здесь разрывная длина в несколько раз больше предельной начальной. Видимо, для начального зажигания дуги переменного тока имеет значение совпадение момента отрыва электрода от изделия с фазой высокого напряжения синусоиды трансформатора. Напротив, после длительного горения сильный нагрев электродов и дуги способствуют высокой надежности ее повторных зажигания, а поэтому и высокой эластичности.

Итак, несмотря на близость физического смысла и сходство методик определения, разрывная длина слабо коррелируется с предельной начальной. Поэтому применять $I_{др}$ в качестве критерия надежности зажигания дуги некорректно. Тем не менее, большинство исследователей ограничиваются для характеристики сварочных свойств материалов, технологий и оборудования только более простой в определении разрывной длиной, что явно недопустимо.

1.3. Косвенные критерии зажигания коротким замыканием

Как было сформулировано выше, к косвенным критериям оценки относят электрические характеристики источников, оказывающие заметное влияние на конкретное сварочное свойство. В отношении надежности начального зажигания, как будет показано ниже — это напряжение холостого хода, тип и наклон внешней характеристики источника и индуктивность сварочной цепи, а для современных источников также параметры комбинированной внешней характеристики и параметры специальных функций. Для выявления эффективных приемов воздействия на зажигание необходимо установить связи электрических характеристик — тока и напряжения в динамике — с параметрами источника и сварочной цепи в целом.

1.3.1. Математическое описание переходных процессов при зажигании

Этап короткого замыкания для конвенционального источника постоянного тока охарактеризуем балансом напряжений только двух электрических элементов, потому что дуга при этом еще отсутствует:

— источник с напряжением $U_{\text{и}}$, зависящим от постоянных напряжения холостого хода $U_{\text{х}}$ и внутреннего сопротивления $R_{\text{и}}$, а также от текущих значений тока короткого замыкания $I_{\text{к}}$;

— сварочная цепь (провода, дроссель) с напряжением $U_{\text{Л}}$, зависящим от их общей индуктивности L и от тока $I_{\text{к}}$.

Развернутый вид баланса

$$U_{\text{х}} - R_{\text{и}}I_{\text{к}} = L \frac{dI_{\text{к}}}{dt}$$

А решение этого дифференциального уравнения дает уравнение переходного процесса по току на этапе короткого замыкания:

$$I_{\text{к}}(t) = \frac{U_{\text{х}}}{R_{\text{и}}} (1 - e^{-\frac{R_{\text{и}}}{L}t}) \quad (1.1)$$

Отображаемое уравнением (1.1) быстрое нарастание тока $I_{\text{к}}$ в начале короткого замыкания до $I_{\text{кн}}$ типично почти для любых источников (см., например, рис. 1.1). У известных источников для ручной сварки пиковое значение тока ограничивается интервалом $I_{\text{кн}} = (1,2-3) I_{\text{дв}}$. При меньших $I_{\text{кн}}$ торец электрода прогревается слабо, что может спровоцировать как прилипание, так и обрыв. При больших значениях вероятен перегрев стержня, приводящий к повреждению электродного покрытия. В нормативной документации ограничивают только максимальное значение пикового тока $I_{\text{кн}} \leq 3I_{\text{ном}}$ [222]. А в качестве косвенных критериев надежности зажигания на этапе короткого замыкания можно принять входящие в уравнение (1.1) параметры сварочной цепи — $U_{\text{х}}$, $R_{\text{и}}$ и L .

Этап установления дуги при скачкообразном удлинении (возникновении) дуги проанализируем с учетом трех элементов:

— дуга с напряжением $U_{\text{д}}$, включающим постоянную составляющую (сумму катодного и анодного падения напряжения $U_{\text{ка}}$) и переменную (падение напряжения в столбе, зависящее от градиента потенциала $\varepsilon_{\text{ст}}$ и текущей длины дуги $l_{\text{д}}$);

— источник с напряжением $U_{\text{и}}$,

— индуктивность с напряжением $U_{\text{Л}}$.

Баланс напряжений — $U_{\text{д}} = U_{\text{и}} - U_{\text{Л}}$, а его развернутая форма

$$U_{\text{ка}} + \varepsilon_{\text{ст}}l_{\text{д}} = U_{\text{х}} - R_{\text{и}}I_{\text{д}} - L \frac{dI_{\text{д}}}{dt} \quad (1.2)$$

Задавшись скачкообразным значением начальной длины дуги $l_{\text{дн}}$, с учетом предшествующего короткого замыкания с током $I_{\text{кз}} = \frac{U_{\text{х}}}{R_{\text{и}}}$ получаем уравнение переходного процесса:

$$I_{\text{д}}(t) = \frac{U_{\text{х}} - U_{\text{ка}} - \varepsilon_{\text{ст}} l_{\text{дн}}}{R_{\text{и}}} + \frac{U_{\text{ка}} + \varepsilon_{\text{ст}} l_{\text{дн}}}{R_{\text{и}}} e^{-\frac{R_{\text{и}}}{L} t} \quad (1.3)$$

Отображаемый уравнением (1.3) постепенно замедляющийся спад тока при переходе от короткого замыкания к дуговому процессу вполне типичен для конвенциональных источников без специальных функций (см., например, рис. 1.1). При выводе уравнения имитировался источник с прямолинейно падающей внешней характеристикой ($Z_{\text{и}} = R_{\text{и}} = \text{const}$). Но результаты его качественного анализа могут быть распространены и на источники с другими типами характеристик — естественно пологопадающей и выпуклой крутопадающей. Уравнение не годится для расчетной оценки зажигания у источников с искусственным формированием внешних характеристик.

Выполним анализ уравнения (1.3) с целью выработки приемов повышения надежности зажигания на этапе установления дуги. Очевидно, что для успешного зажигания установившийся через 1–3 с ток $I_{\text{д}}$ должен быть выше минимально возможного для данного электрода сварочного тока $I_{\text{свmin}}$ (подробней см. разд. 4.3). Из уравнения следует, что ток $I_{\text{д}}$ прямо зависит от напряжения холостого хода, обратно — от сопротивления источника и менее значительно — от индуктивности. Две первые характеристики — $U_{\text{х}}$ и $R_{\text{и}}$ (или $Z_{\text{и}}$) — и предлагаются в качестве косвенных критериев при оценке надежности зажигания. Сведения о них, как правило, содержатся в технической документации на источник, что позволяет еще предварительно, без проведения эксперимента, судить о надежности зажигания. При необходимости они легко определяются и в простейшем электротехническом эксперименте. Третья характеристика — индуктивность L — для этих целей годится в меньшей степени, поскольку обычно не приводится в документации на источник и трудна в экспериментальном определении.

1.3.2. Электрические характеристики источника, влияющие на зажигание

Напряжение холостого хода $U_{\text{х}}$ — самый распространенный косвенный критерий, влияющий на надежность начального зажигания на обоих его этапах. На этапе короткого замыкания при увеличении $U_{\text{х}}$ возрастает ток $I_{\text{кз}}$, поэтому интенсифицируется нагрев микроконтактов на границе электрода и изделия. Это благоприятствует последующему развитию дугового разряда, хотя и не гарантирует полного устранения прилипания электрода к изделию. На этапе установления дугового про-

цесса при увеличении U_x возникает и дольше сохраняется высокое значение тока $I_{дн}$, что позволяет удерживать дугу с большей начальной длиной $l_{дн}$. Итак, увеличение U_x дает однозначно положительный эффект, способствуя надежному начальному зажиганию.

Диапазон известных значений напряжения холостого хода у типичных источников постоянного тока для ручной сварки 40–113 В амплитудного значения. Предельно низкое напряжение 40 В назначается для бытовых и монтажных выпрямителей с целью снижения их массы и стоимости. Но успешное начальное зажигание от таких источников способен обеспечить только квалифицированный сварщик, к тому же при использовании высокотехнологичных электродов, например, с рутиловым покрытием. Предельно высокое напряжение 113 В ограничивается по соображениям безопасности. Такое напряжение можно рекомендовать при использовании электродов с основным покрытием, содержащим вещества с сильным деионизирующим действием, например, плавленый шпат CaF_2 , которые резко снижают надежность начального зажигания. Такое же высокое напряжение следует рекомендовать при использовании электродов с целлюлозным покрытием, для которых типична длинная дуга.

При ручной сварке на переменном токе диапазон рекомендуемых значений U_x более узкий — от 45 до 80 В действующего (среднеквадратического) значения. Нижний предел 45 В повышен в сравнении с источниками постоянного тока именно из-за худшей надежности зажигания и низкой устойчивости дуги переменного тока. Верхний предел 80 В понижен из-за большей электрической опасности переменного тока. Важно отметить, что источники переменного тока, предназначенные для работы в средах с повышенной электрической опасностью, разрешается изготавливать с напряжением не более 48 В [20]. Это ограничение распространяется и на бытовые технологические аппараты переменного тока, работающие без принятия дополнительных мер для обеспечения безопасности человека.

При автоматической сварке под флюсом, где зажигание обеспечивается отводом от изделия заранее закороченного электрода, допустимое напряжение U_x от 60 до 141 В. Такое повышение обоих пределов U_x объясняется, с одной стороны, дестабилизирующим действием расплавленного шлака, шунтирующего дугу. С другой стороны, более высокое напряжение допускается из-за смягчения требований электрической безопасности, благодаря отсутствию контакта сварщика с токопроводящими частями при автоматическом процессе.

Тип и наклон внешней характеристики — менее распространенные косвенные критерии. Наилучший тип с точки зрения начального зажигания — жесткая характеристика (при $U_x > 40$ В). При этом на этапе

короткого замыкания ток I_K ограничен только небольшим сопротивлением источника (по ГОСТ 60974-1-2012 ρ_n от 0 до $-0,07$ В/А). А на следующем этапе установлению дуги способствует постоянство напряжения источника ($U_d \approx U_x$).

Но при ручной сварке эта рекомендация вступает в противоречие с требованиями настройки тока и устойчивого горения дуги, для которых необходимы падающая характеристика и относительно низкое рабочее напряжение источника $U_n = U_d = 18\text{--}30$ В. Компромиссное решение — выпуклая крутопадающая характеристика, естественным образом получаемая в трансформаторе с увеличенным рассеянием или в индукторном генераторе переменного тока (см. рис. 4.25). У нее при малом токе напряжение сравнительно велико, а наклон мал (ρ_n от $-0,02$ до $-0,2$ В/А), тогда как при настроенном сварочном токе наклон велик (ρ_n от $-0,5$ до -5 В/А). Но оптимальное удовлетворение нескольких требований к наклону достигается только при комбинированной характеристике.

Комбинированная внешняя характеристика современного источника для ручной сварки покрытым электродом может состоять из четырех участков (рис. 1.9). Как правило, каждый участок отвечает за выполнение одной функции источника, и оптимизация параметров каждого участка направлена на обеспечение конкретного сварочного свойства. Но при зажигании дуги коротким замыканием в работе поочередно участвуют практически все участки. Рассмотрим, как приведенная характеристика на каждом участке выполняет специфические требования к отдельным этапам зажигания.

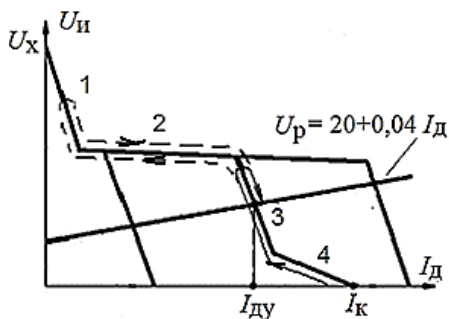


Рис. 1.9. Внешняя характеристика источника для ручной сварки с траекториями процесса зажигания

Участок 1 обычно формируется специальной цепью высоковольтной подпитки с напряжением холостого хода $80\text{--}113$ В и током короткого замыкания $5\text{--}30$ А. Он предназначен для заполнения пауз в токе основной силовой цепи источника. При зажигании он может использоваться для вы-

полнения функции мягкого пуска (см. разд. 1.4.2). Жесткий участок 2 формируется основной силовой цепью и имеет напряжение холостого хода от 35 до 70 В и наклон ρ_n от 0 до $-0,07$ В/А. Его параметры приняты такими, чтобы обеспечивать достаточную эластичность дуги при отводе электрода в процессе зажигания до расстояния около $(2,5-3)d_3$.

Основной падающий участок 3 обеспечивает поддержание устойчивого дугового разряда при настроенном значении тока $I_{ду}$ и напряжении, близком к напряжению условной рабочей нагрузки по уравнению $U_p = 20 + 0,04I_{д.}$ Этот участок вступает в действие в конце процесса зажигания. Жесткий участок форсирования 4 предназначен для независимой от сварочного тока настройки тока короткого замыкания в интервале от $I_{ду}$ до $2I_{ду}$. Его основное назначение — управление переносом капель электродного металла (см. разд. 9.4). Но с его помощью можно настраивать и ток короткого замыкания при зажигании, например по методу горячего пуска (см. разд. 1.4.1). Типичная траектория перемещения рабочей точки при зажигании в пренебрежении электромагнитной инерцией источника нанесена на график тонкой линией со стрелкой, а при значительном отводе электрода — штриховой линией.

1.4. Специальные функции для повышения надежности зажигания

Применительно к зажиганию коротким замыканием к специальным функциям относятся: начальное ограничение напряжения холостого хода; мягкий, горячий и комбинированный пуск, а также защита от прилипания.

1.4.1. Горячий пуск

Горячий пуск (hot start) — электротехнический прием, заключающийся в начальном зажигании при повышенном токе. Как видно на рис.1.10 [15], горячий пуск начинается на этапе короткого замыкания при токе I_k , соответствующем настроенному току $I_{гп}$ ($I_k = I_{гп} = 150$ А), а затем продолжается на этапе установления дугового процесса при этом же токе ($I_{дн} \approx I_{гп}$). По окончании горячего пуска с настроенной длительностью $t_{гп} = 0,5$ с источник переходит к поддержанию настроенного сварочного тока $I_{сву} = 100$ А. Отметим, что именно горячий пуск обеспечил надежное зажигание дуги с экстремально большой начальной длиной $l_{дн} = 12$ мм, тогда как без горячего пуска при тех же условиях $l_{днmax} = 10$ мм.

Цели и достоинства горячего пуска заключаются в следующем:

— на этапе короткого замыкания несколько снижается вероятность прилипания электрода к изделию,

- на этапе установления дугового процесса существенно снижается вероятность обрыва дуги,
- быстрее устанавливается регулярный капельный перенос,
- увеличивается глубина проплавления изделия в начале шва.

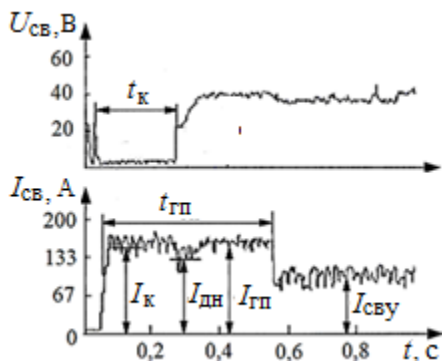


Рис. 1.10. Зажигание с горячим пуском в штативе (ВДУ-506МТ, УОНИ 13/55, Ø3 мм, 100 А)

Рассмотрим, как оптимизировать параметры горячего пуска $I_{гп}$ и $t_{гп}$ для достижения каждой из этих целей.

Ток горячего пуска $I_{гп}$ в большинстве серийных источников задается в зависимости от установленного сварочного тока по соотношению $I_{гп} = (1,4-2) I_{сву}$. К сожалению этим соотношением не учитывается факт ухудшения условий зажигания на низких режимах. Поэтому далее ток горячего пуска будем назначать в зависимости от тока, считающегося нормальным для сварки электродом данного диаметра. Принятые в следующем эксперименте в качестве нормальных значения токов $I_{св.норм}$ системно обоснованы в табл. 4.1. Кроме того, желательно регламентировать требования к току горячего пуска по отдельности на этапах короткого замыкания и установления дугового процесса.

На этапе короткого замыкания последнюю задачу легко решить с использованием агрегата с чопперным управлением (табл. 1.2). Дело в том, что в нем горячий пуск выполняется только благодаря независимой настройке тока короткого замыкания. Здесь чистота эксперимента в части оценки влияния $I_{ку}$ на зажигание обеспечивается отсутствием большого тока на этапе установления дугового процесса.

В качестве критерия для оценки надежности зажигания в этом эксперименте принято количество касаний $N_{кас}$ электродом изделия до установления дугового процесса. Для принятых электродов установленный сварочный ток варьировался в интервале от 50 до 100 % от нормального значения $I_{св.норм}$, а установленный ток короткого замыкания —

в интервале от 90 до 250 % от $I_{св.норм}$. Из данных табл. 1.2 следует, что при сварке электродами с рутиловым покрытием (ОЗС-12 и ОЗС-4) зажигание происходит с первого касания при любом начальном токе $I_{ку}$ — для таких электродов горячий пуск не обязателен. Для электродов с основным покрытием (УОНИ 13/55) менее отчетливо, но все же проявляется прямая зависимость надежности зажигания от величины тока короткого замыкания. На этом и других электродах с основным покрытием зажигание с первого касания обеспечивается при $I_{ку}/I_{св.норм} \geq 1,3$.

Таблица 1.2.

*Зависимость надежности зажигания с горячим пуском
от установленного тока короткого замыкания
(агрегат АДД-4005 с чоппером ЧПР-315)*

Диаметр электрода	2		2,5	3				4		5	6
Марка электрода	ОЗС-12		УОНИ 13/55								ОЗС-4
Нормальный ток $I_{св.норм}$, А	60		80	100				150		200	320
Установленный сварочный ток $I_{сву}$, А	30	60	80	60	80	100	100	100	150	200	200
Установленный ток короткого замыкания $I_{ку}$, А	60	80	200	90	120	120	210	140	200	290	290
Кратность тока короткого замыкания $I_{ку}/I_{сву}$	2	1,3	2,5	1,5	1,5	1,2	2,1	1,4	1,3	1,4	1,4
Отношение тока короткого замыкания к нормальному $I_{ку}/I_{св.норм}$	1	1,3	2,5	0,9	1,2	1,2	2,1	0,9	1,3	1,4	0,9
Количество касаний при зажигании $N_{кас}$	1	1	1,7	3,3	1,8	2,0	1	1,7	1	1	1

Примечание: жирным шрифтом выделены неудовлетворительные результаты

На этапе установления дугового процесса изучение отдельного влияния $I_{гп}$ на результат горячего пуска выполнили на опытной модели выпрямителя ВДУ-306МТ с МП-управлением. У него в момент касания электродом изделия включается только подпитка с током 20 А, тогда как основной источник запускается в работу в режиме горячего пуска только в момент отрыва электрода от изделия. Здесь ток $I_{гп}$ настраивался со значениями, равными 1; 1,3; 1,5 и 1,7 от $I_{св.норм}$ (табл. 1.3). В качестве критерия оценки надежности зажигания также принято количество касаний $N_{кас}$. Отчетливо видна прямая зависимость надежности зажигания от $I_{гп}$. Горячий пуск более эффективен именно для установления дугового процесса — зажигание с первого касания обычно обеспечивается при $I_{гп}/I_{св.норм} \geq 1,4$.

Таблица 1.3.

Зависимость надежности зажигания от тока горячего пуска на этапе установления дуги (тиристорный выпрямитель ВДУ-306МТ)

Диаметр электрода, мм		2	3	4	5	6
Марка электрода		ОЗС-12	УОНИ 13/55			ОЗС-4
Установленный сварочный ток $I_{сву}$, А		60	100	150	200	270
Количество касаний при зажигании $N_{кас}$						
Отношение тока горячего пуска к нормальному $I_{гп}/I_{св.норм}$	1	1,3	2,0	1,8	1,3	1,1
	1,3	1	1,3	1,8	1,3	1,1
	1,5	1	1,3	1,0	1,1	—
	1,7	1	1	1	1	—

Примечание: жирным шрифтом выделены неудовлетворительные результаты

Отметим некоторые ограничения на величину $I_{гп}$, не отраженные в вышеописанных экспериментах. Во-первых, на этапе короткого замыкания увеличение тока горячего пуска дает неоднозначный результат. С одной стороны, при этом интенсифицируется нагрев торца электрода, что освобождает сварщика от необходимости контролировать длительность короткого замыкания и позволяет ему зажигать дугу резким коротким ударом («клевком»). С другой стороны, быстрый разогрев микроконтактов приводит к увеличению объема расплавленного металла в перемычке, что повышает прочность прилипания в случае задержки при отводе электрода. Во-вторых, при очень большом токе $I_{гп} = (1,7-2)I_{св.норм}$ короткое замыкание иногда прекращается не в результате отвода электрода, а из-за взрыва перемычки. В этом случае прилипание устраняется полностью, но на тонком металле, и особенно в корневом (первом) проходе соединений со скосом кромок могут возникнуть прожоги.

Итак, с учетом вышеприведенных соображений для надежного зажигания при ручной сварке ток горячего пуска можно принимать в зависимости от нормального значения для данного электрода по соотношению $I_{гп} = (1,4-1,5) I_{св.норм}$

Если для конкретного электрода отсутствуют сведения о нормальном токе, то при известной рекомендации $I_{св.норм} = (20 + 6d_3)d_3$, ток горячего пуска

$$I_{гп} = (30 + 9d_3)d_3 \quad (1.4)$$

Длительность горячего пуска $t_{гп}$ в современных источниках устанавливают от 0,1 до 5 с (иногда до 25 с). Экспериментальное обоснование выбора $t_{гп}$ выполнено с использованием тиристорного выпрямителя ВДУ-506МТ с МП-управлением (табл. 1.4). Эта система управления начинает отсчет $t_{гп}$ с момента касания электродом изделия и поэтому учитывает как интервал короткого замыкания, так и интервал установления дугового процесса ($t_{гп} \geq t_k + t_{дв}$). Горячий пуск, как уже отмечалось выше, наиболее эффективен на этапе установления дугового процесса. А в случае прекращения горячего пуска на этапе короткого замыкания, т.е. еще до появления дуги, лишь несколько снижается вероятность прилипания и практически не изменяется вероятность обрывов.

Таблица 1.4.
Зависимость надежности зажигания от длительности
горячего пуска (тиристорный выпрямитель ВДУ-506МТ)

Диаметр электрода, мм		2	2,5	3	4	5	3,2	4
Марка электрода		ОЗС-12	УОНИ 13/55			ТМЛ-1У	Fox Cel	
Установленный сварочный ток $I_{сву}$, А		60	80	100	150	200	110	150
Установленный ток горячего пуска $I_{гп}$, А		90	120	150	225	300	165	225
		Предельная начальная длина дуги $l_{днmax}$, мм						
Длительность горячего пуска $t_{гп}$, с	0,5	18	8	10	13	13		
	1	19	11	12	16	16		
	1,5						4 (7*)	6 (9*)

Примечание: жирным шрифтом выделены неудовлетворительные результаты

* зажигание после нескольких касаний электродом изделия

При ручном зажигании типичная моторная реакция сварщика задает длительность короткого замыкания t_k от 0,05 до 0,5 с. Поэтому в экс-

перименте проверялись только относительно длительные настройки $t_{\text{гп}} = 0,5; 1$ и $1,5$ с. В качестве критерия для оценки надежности была принята предельная начальная длина дуги $l_{\text{днmax}}$ при зажигании в штативе. Эксперимент сопровождался осциллографированием тока и напряжения для контроля параметров горячего пуска (см. рис. 1.10). Как следует из данных табл. 1.4, при сварке электродами с рутиловым покрытием (ОЗС-12) предельная начальная длина дуги имеет очень большую величину — $18\text{--}19$ мм, многократно превышающую рекомендуемую длину дуги при сварке ($l_{\text{д}} = d_3$). Здесь подтверждается сделанный ранее вывод о том, что для таких электродов горячий пуск не обязателен.

При сварке электродами с основным покрытием (УОНИ 13/55, ТМЛ-1У) даже самая малая длительность горячего пуска $t_{\text{гп}} = 0,5$ с обеспечивает приемлемые результаты — $l_{\text{днmax}} = (2,6\text{--}3,3)d_3$. А при увеличении длительности до 1 с предельная начальная длина еще увеличивается — $l_{\text{днmax}} > 3d_3$ даже для электродов марки ТМЛ-1У, наиболее проблемных в отношении сварочных свойств.

Хуже обстоит дело с надежностью зажигания у электродов с целлюлозным покрытием (например, *Fox Cel*). Мощные газовые потоки, образующиеся при зажигании дуги с такими электродами, резко удлиняют дугу и сильно турбулизируют межэлектродное пространство, что не может не сказаться на пространственной устойчивости возникающей дуги. Как следует из данных табл. 1.4, даже увеличение длительности горячего пуска для электродов *Fox Cel* до $t_{\text{гп}} = 1,5$ с обеспечило только $l_{\text{днmax}} = (1\text{--}2)d_3$, что явно не достаточно для надежного зажигания. Для таких электродов необходима настройка обоих параметров на максимальном уровне — $I_{\text{гп}} = (1,7\text{--}2)I_{\text{св.норм}}$, $t_{\text{гп}} = 1,5\text{--}2$ с. Полезно также и увеличение напряжения холостого хода источника выше 80 В. Но при этом необходимо учитывать опасность прожога на тонком металле при чрезмерной длительности $t_{\text{гп}}$.

Итак, с учетом вышеприведенных соображений длительность горячего пуска для повышения надежности зажигания при ручной сварке следует устанавливать от $0,5$ до 2 с в зависимости от типа электродного покрытия и толщины свариваемого изделия, по умолчанию — $0,5$ с.

Горячий пуск для быстрого установления регулярного переноса электродного металла исследован в работе [9]. Автоматическая обработка осциллограмм при установлении процесса ручной сварки покрытиями электродами позволила получить многочисленные данные по длительности коротких замыканий каплями электродного металла на ванну (рис. 1.11). Эксперимент выполнялся на трех марках электродов: АНО-4 рутилового типа с каплями малого размера ($d_{\text{к}} < d_3$), УОНИ 13/55 основного типа с каплями среднего размера ($d_{\text{к}} \approx d_3$) и ДСК-50 (АНО-27) основного типа с каплями крупного размера ($d_{\text{к}} > d_3$).

На рис. 1.11, *а* видно, что длительность коротких замыканий каплями $t_{\text{кк}}$, которая считается пропорциональной размерам капель, в установившемся процессе составляет соответственно 4–13, 7–18 и 9–20 мс. Для принятого диаметра электрода 4 мм нежелательно превышение длительностью $t_{\text{кк}}$ значения 20 мс (показано штриховкой). Такая затяжка переноса грозит опасностью прилипания электрода к ванне, а это, в свою очередь, вынуждает сварщика к удлинению дуги, что приводит к ухудшению газовой защиты и насыщению металла сварочной ванны атмосферными газами. Между тем, при отсутствии горячего пуска, как можно заметить на рис. 1.11, *а*, в начале сварки (в первые 1,5–3 с) длительность $t_{\text{кк}}$ больше 20 мс и может достигать 60 мс. В этом и заключается, как считают авторы работы [9], причина начальной пористости сварных швов.

Для борьбы с этим дефектом предлагается горячий пуск. На рис. 1.11, *б* приведены результаты измерения $t_{\text{кк}}$ при длительности $t_{\text{гп}}$, равной соответственно 1; 2,5 и 3 с. Этот прием привел к резкому снижению $t_{\text{кк}}$ (и размеров капель) сразу после зажигания и, как отмечают авторы, позволил полностью устранить начальную пористость сварных швов. Заключительная рекомендация авторов работы [9] относительно параметров горячего пуска: ток $I_{\text{гп}} = (1,3–1,5) I_{\text{св}}$, длительность $t_{\text{гп}}$ — в зависимости от марки электрода, точнее, от типа капельного переноса (для электродов с мелко-, средне- и крупнокапельным переносом соответственно 1–2, 2 и 3 с).

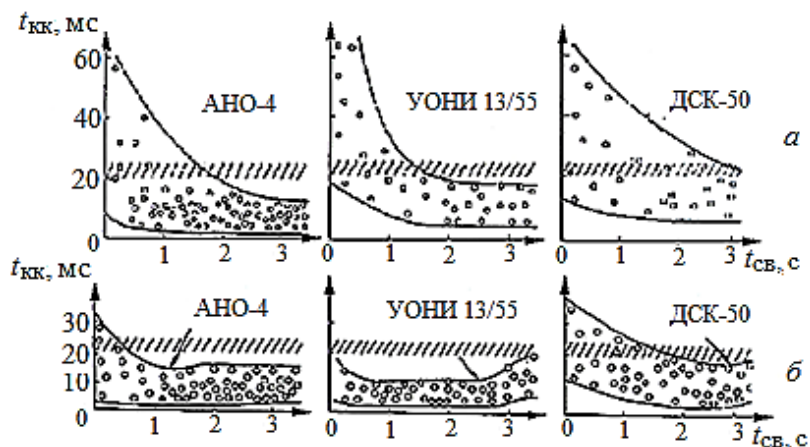


Рис. 1.11. Капельный перенос электродного металла при начале ручной сварки покрытыми электродами без горячего пуска (*а*) и с ним (*б*) — стрелками обозначен момент окончания горячего пуска (электроды Ø4 мм, $I_{\text{св}} = 160–180$ А, $I_{\text{гп}} = 210–250$ А, обратная полярность, нижнее положение)

1.4.2. Мягкий пуск

Мягкий пуск (soft start, cold start) — электротехнический прием, заключающийся в начальном зажигании коротким замыканием, но при пониженном токе.

На рис. 1.12 показан процесс зажигания дуги с мягким пуском при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом. Как видно, в интервале 1 при предварительной подаче аргона потенциал на электроде отсутствует. С момента 2 касания электродом изделия идет короткое замыкание длительностью около 0,3 с при токе мягкого пуска $I_{мп} = 43$ А. После отрыва электрода от изделия мягкий пуск с тем же током продолжается в интервале 3, но уже при горячей дуге с начальным напряжением 19 В. По истечении настроенной длительности мягкого пуска $t_{мп} = 1$ с в интервале 4 длительностью $t_{нар} = 0,3$ с происходит нарастание тока до величины настроенного сварочного $I_{сву} = 280$ А. Установление процесса завершается в интервале 5 при появлении стабильного напряжения, равного 15 В.

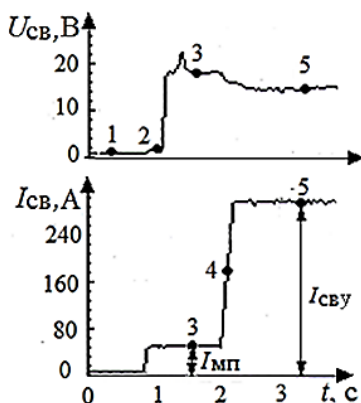


Рис. 1.12. Мягкий пуск при аргонодуговой сварке (выпрямитель ВДУ-506МТ, электрод ЭВЛ Ø4 мм, 280 А, 15 В, прямая полярность)

Аргонодуговая сварка на постоянном токе дугой прямой полярности характерна очень высокой устойчивостью. Этому способствуют как мощная термоэлектронная эмиссия с сильно нагретого вольфрамового электрода, так и низкая теплопроводность аргона. Поэтому мощное короткое замыкание при начальном зажигании здесь не обязательно. Наоборот, зажигание при настроенном сварочном токе и, тем более, повышенном токе короткого замыкания вредно, так как вызывает переход частиц вольфрама в шов, что приводит к недопустимому изменению его химического состава. Поэтому ранее аргонодуговая сварка, как пра-

вило, начиналась бесконтактным способом — высоковольтным пробоем межэлектродного промежутка с помощью осциллятора.

С 70-х годов благодаря совершенствованию элементной базы источников стало возможным построение быстродействующих систем программного управления сварочным током, в том числе для начального зажигания дуги в аргоне. Длительно горящую малоамперную дугу, поддерживающую межэлектродный промежуток в ионизированном состоянии для готовности к легкому зажиганию мощной основной дуги, называют дежурной (*pilot arc*).

Режим контактного зажигания при аргонодуговой сварке характеризуется следующими параметрами:

- ток мягкого пуска $I_{мп}$,
- длительность мягкого пуска $t_{мп}$,
- время нарастания тока $t_{нар}$ до настроенного сварочного.

Ток мягкого пуска по разным литературным источникам и эксплуатационным документам аргонодуговых установок задается либо как часть от настроенного сварочного — $I_{мп} = (0,1-0,3)I_{сву}$, либо как постоянная величина для данного источника — от 2 до 50 А.

Таблица 1.5.

Отработка параметров мягкого пуска при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом (выпрямитель ВДУ-506М)

Ток мягкого пуска $I_{мп}$, А	Диаметр электрода d_z , мм	1	1,6	2	3	4	6
	Сварочный ток $I_{сву}$, А	70	100	130	200	280	350
8	Предельная начальная длина дуги $l_{днпах}$, мм	25	25	20	25	25	15
	Состояние электрода	Нет оплавления при любой $t_{мп}$					
20	Предельная начальная длина дуги $l_{днпах}$, мм	>35	>35	>35	>35	>35	30
	Состояние электрода	Нет оплавления при $t_{мп} = 5$ с					
30	Предельная начальная длина дуги $l_{днпах}$, мм	>35	>35	>35	>35	>35	>35
	Состояние электрода	Оплавление торца при $t_{мп} = 5$ с		Нет оплавления при $t_{мп} = 5$ с			

Для обеспечения чистоты эксперимента по выбору $I_{мп}$ (табл. 1.5) удобно использовать тиристорный выпрямитель ВДУ-506М с высоковольтной подпиткой. Подпитка — вспомогательный маломощный выпрямитель с балластным реостатом ($U_x = 93$ В) — при зажигании бес-

печивает процесс мягкого пуска. Ток мягкого пуска настраивался в три ступени (8, 20 и 30 А) изменением сопротивления балластного реостата. Критериями для выбора $I_{\text{мп}}$ были приняты предельная начальная длина дуги $l_{\text{днmax}}$, а также отсутствие оплавления торца вольфрамового электрода марки ЭВЛ и поверхности образца из нержавеющей стали.

Как видно, максимально возможное значение по условию отсутствия оплавления установлено для электродов диаметром 1 и 1,6 мм ($I_{\text{мпmax}} = 30$ А). Минимально возможное значение определено только для электрода диаметром 6 мм ($I_{\text{мпmin}} = 8$ А), поскольку при этом $l_{\text{днmax}} = 15$ мм еще превышает $2d_3$.

Вышеописанный эксперимент был повторен с тиристорным выпрямителем ВДУ-506МТ, у которого мягкий пуск обеспечивается совместной работой подпитки и основного тиристорного блока. Именно такой случай отражен на рис. 1.12, где $I_{\text{мп}} = 43$ А. В этой серии экспериментов установлено, что, например, для электрода диаметром 4 мм ток $I_{\text{мп}}$, равный 25 А, мал для надежного пуска, хотя в предыдущей серии с выпрямителем ВДУ-506М такой ток признан достаточным. Причина — в чрезмерной пульсации тока у ВДУ-506МТ. Поэтому диапазон оптимальных токов для этого электрода — $I_{\text{мп}} = 28\text{--}56$ А.

Приемлемое отношение $I_{\text{мп}} / I_{\text{сву}}$ по результатам обоих экспериментов получилось 0,1–0,28, что совпадает с приведенными выше литературными данными. Но поскольку при аргонодуговой сварке ток $I_{\text{сву}}$ обычно принимают произвольно из чрезвычайно широкого диапазона с кратностью $I_{\text{свmax}} / I_{\text{свmin}}$ до 35, полезней связать значения тока $I_{\text{мп}}$ с величиной диаметра вольфрамового электрода. По вышеприведенным крайним значениям для электродов от 1 до 6 мм получаем диапазон допустимых значений $I_{\text{мп}} = (7\text{--}14) d_3$. Если в источнике для сварки электродами диаметром 1–4 мм не предусмотрена настройка тока мягкого пуска, то, допуская небольшое оплавление электродного и основного металла, необходимо обеспечивать постоянное значение $I_{\text{мп}} = 28\text{--}30$ А.

Длительность мягкого пуска $t_{\text{мп}}$ — параметр менее критичный. Если ее отсчет ведется от момента отрыва электрода от изделия, то для установления горения маломощной дуги при мягком пуске достаточно времени $t_{\text{мп}} = t_{\text{дл}}$ порядка 0,2–2,5 с, соответствующего образованию распределенного катодного пятна [89]. С увеличением тока $I_{\text{мп}}$ необходимое время $t_{\text{дл}}$ снижается. Например, для электрода диаметром 4 мм в интервале токов 20–40 А $t_{\text{дл}}$ уменьшается с 1,2 до 0,2 с (см. рис. 3.8). Но это требование к величине $t_{\text{мп}}$ нестрогое, поскольку вполне допустим переход к основному режиму еще до полного установления дугового разряда с распределенным катодным пятном. Если включать в состав $t_{\text{мп}}$ еще и длительность короткого замыкания электродом на изделие $t_{\text{к}}$, то

при типичной реакции сварщика при зажигании, оцениваемой в 0,05–0,5 с, можно назначать $t_{мп} = 0,3–2$ с.

Заметим также, что многократное завышение $t_{мп}$ при малом токе мягкого пуска $I_{мп}$ не вызывает негативных последствий для качества сварки. Известна даже практика использования дежурной дуги для освещения при поиске сварщиком точного места начала сварки.

Время (или скорость) нарастания тока при переходе от дежурной дуги к основной имеет смысл задавать для предотвращения начального выплеска жидкого металла на поверхности свариваемых деталей. Есть также сведения, что при постепенном нарастании тока меньше повреждается вольфрамовый электрод. Наконец, плавное нарастание тока может оказаться полезным при автоматической сварке, для того чтобы предотвратить появление прожога при медленном разгоне привода перемещения. На рис. 1.12 показано нарастание тока от 43 до 280 А за $t_{нар} = 0,3$ с. Не отмечено ни выплеска основного металла, ни повреждения электрода. Приведенные в литературных источниках или реализованные в конкретных сварочных установках значения $t_{нар} = (0–5)$ с, видимо, можно признать приемлемыми, хотя этот параметр также не критичен.

Мягкий пуск при сварке покрытыми электродами полезен главным образом для предотвращения прилипания электрода к изделию (рис. 1.13). Экспериментально установлено достаточное значение тока $I_{мп} = (0,2–0,3)I_{св.норм.}$. Прилипание, действительно, устраняется на всех режимах. Переход к основному режиму здесь должен происходить быстро из-за относительно низкой устойчивости дежурной дуги.

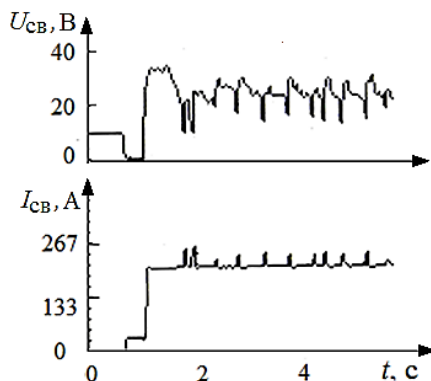


Рис. 1.13. Мягкий пуск при ручной сварке покрытым электродом (чоптер ЧПП-315 с выпрямителем ВДМ-1201, электрод УОНИ 13/55 Ø5 мм, 200 А, 28 В, $I_{мп} = 40$ А)

В описанном эксперименте время перехода 8 мс ограничено только быстродействием МП-системы управления при ее реакции на отрыв элек-

трода от изделия. Обнаружен и недостаток такого процесса — повышенная склонность к ноздреватости (внешней пористости) на начальном участке шва при сварке электродами с основным покрытием. Причина — начало сварки относительно холодным электродом на холодном изделии.

1.4.3. Комбинированный пуск

Комбинированный пуск — электротехнический прием начального зажигания, используемый при ручной сварке покрытым электродом и заключающийся в последовательном включении сначала пониженного, а затем повышенного тока.

Алгоритм комбинированного пуска с использованием транзисторного постового регулятора с МП-системой управления — чоппера — можно проследить по осциллограммам (рис. 1.14). Перед началом зажигания источник находится в состоянии ожидания с безопасным напряжением 12 В (интервал 1). С момента касания электродом изделия начинается интервал мягкого пуска длительностью $t_{\text{мп}} = 0,3$ с, включающий плавное нарастание (2) и сохранение (3) тока $I_{\text{мп}} = 40$ А. При этом источник находится в режиме короткого замыкания, поэтому напряжение на зажимах источника снижается почти до нуля. С момента отрыва электрода от изделия возникает маломощная дуга в режиме мягкого пуска, и происходит быстрое нарастание напряжения дуги по мере увеличения ее длины. После надежного установления дугового процесса МП-регулятор по сигналу датчика напряжения переводит источник в режим горячего пуска (4). Ток горячего пуска плавно нарастает (5), а затем устанавливается (6) на постоянном уровне $I_{\text{гп}} = 240$ А. т.е. в 1,5 раза превышающем величину установленного сварочного тока. После отсчета $t_{\text{гп}} = 0,5$ с МП-регулятор переводит источник в режим сварки с заданным током $I_{\text{св}} = 160$ А (7).

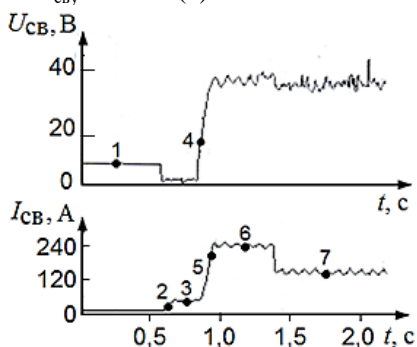


Рис. 1.14. Комбинированный пуск в итативе (чоппер ЧПР-315 + выпрямитель ВДМ-1201, электрод ОК 53.70 Ø 4 мм, 160 А, $l_{\text{дн}} = 14$ мм)

Как видно, в описанном процессе благоприятным образом сочетаются достоинства мягкого и горячего пусков:

— на этапе короткого замыкания благодаря пониженному току практически полностью устраняется вероятность прилипания,

— на этапе установления дугового процесса повышение тока существенно снижает вероятность обрыва дуги.

Принципы оптимизации параметров комбинированного пуска в основном совпадают с изложенными выше для мягкого и горячего пусков:

— начальный ток назначают по соотношению $I_{\text{мп}} = (0,2-0,3)I_{\text{св.норм}}$,

— переход от пониженного тока к повышенному выполняется с началом отвода электрода от изделия,

— повышенный ток назначается по соотношению $I_{\text{гп}} = (1,4-1,5)I_{\text{св.норм}}$,

— длительность интервала повышенного тока настраивается от 0,5 до 2 с (по умолчанию 0,5 с).

Более подробно рассмотрим только алгоритм перехода от пониженного тока к повышенному. МП-регулятор обеспечивает такой переход при последовательном выполнении трех условий:

1) ток > 10 А (датчик тока фиксирует начало мягкого пуска с питанием, например, от источника подпитки);

2) напряжение > 15 В (датчик напряжения фиксирует отрыв электрода от изделия и появление дуги);

3) задержка 20 мс (таймер отсчитывает интервал одновременного выполнения 1 и 2 условий, что необходимо для исключения ложных срабатываний при случайных скачках сварочного напряжения).

На метод комбинированного пуска получен патент РФ на изобретение [21]. Метод рекомендуется при сварке стыков магистральных трубопроводов, для которых безукоризненное зажигание в начале каждого прохода является необходимым условием высокого качества всего сварного соединения.

Пример экспериментальной оценки надежности зажигания с комбинированным пуском при использовании тиристорного выпрямителя ВДУ-306МТ с МП-управлением показал достаточно высокие результаты (см. табл. 1.1). На электродах УОНИ 13/55 диаметром от 3 до 5 мм вероятность зажигания с первой попытки $P_3 = 0,8-0,9$, количество касаний при зажигании $N_{\text{кас}} = 1,2-1,6$, а предельная начальная длина дуги при зажигании в штативе $l_{\text{днmax}} = 10-16$ мм.

Результаты другого, массового, эксперимента по определению величины $l_{\text{днmax}}$ приведены на рис. 1.8. Видно, что источник с прерывистым током, но и с комбинированным пуском — тиристорный выпрямитель ВДУ-306МТ — не уступает по величине $l_{\text{днmax}}$ конвенциональным источникам с непрерывным током — диодному выпрямителю ВД-306Э и вентильному генератору ГД-4006.

1.4.4. Защита от прилипания

Защита от прилипания (antistick) — электротехнический прием при начальном зажигании, заключающийся в ограничении тока в случае чрезмерного затягивания короткого замыкания.

Алгоритм работы инверторного источника для ручной сварки покрытым электродом марки Урал Мастер 500 при срабатывании защиты от прилипания проанализируем с помощью осциллограмм (рис. 1.15). Из режима ожидания (1) с напряжением ограничения холостого хода $U_{ох} = 12$ В источник переходит в режим короткого замыкания (2) с настроенным током горячего пуска $I_{кз} = I_{гп} = 150$ А. По истечении допустимого времени короткого замыкания $t_{ко} = 0,9$ с система управления резко снижает ток короткого замыкания до уровня ограничения (3) — $I_{ок} = 20$ А. При правильно выбранной длительности $t_{ко}$ прилипание электрода к изделию оказывается непрочным, поэтому сварщик быстро прекращает его при легком покачивании электрода. В результате последующего отвода электрода устанавливается дуговой процесс (4) с настроенным током $I_{св} = 100$ А. Как видно, защита не устраняет сам факт прилипания, но ограничивает его длительность с целью снижения перегрева электрода и предотвращения его прочного приваривания к изделию.

Факт прилипания обнаруживает система управления по совпадению трех условий:

- 1) сигнал датчика тока выше минимального сварочного тока, например, 30 А;
- 2) сигнал напряжения ниже минимального напряжения дуги, например, 10 В;
- 3) интервал совпадения двух названных сигналов превышает допустимую длительность короткого замыкания, например, 0,6 с.

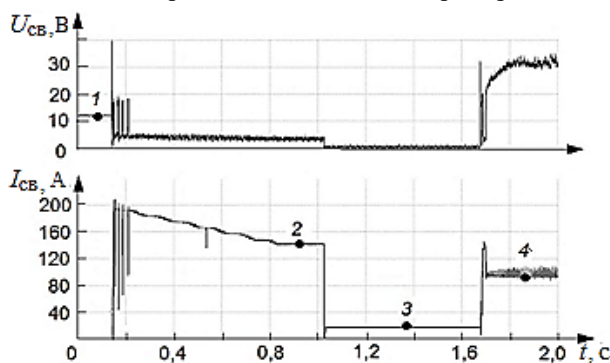


Рис. 1.15. Защита от прилипания при зажигании дуги (инверторный источник Урал Мастер 500, электрод LB52U Ø 3,2 мм, 100 А)

Поясним, как выбираются параметры защиты.

Длительность короткого замыкания до момента ограничения у большинства источников с такой функцией $t_{\text{ко}} = 0,6\text{--}2,5$ с. Минимальная длительность $t_{\text{ко}}$ должна быть такой, чтобы не мешать сварщику с типичной реакцией своевременно отводить электрод от изделия при зажигании. Максимальная длительность $t_{\text{ко}}$ ограничивается так, чтобы не допустить прочного приваривания (прилипания) электрода, и чтобы после срабатывания защиты приваривание устранялось легким наклоном электрода на угол менее 45° .

Ограниченный ток короткого замыкания $I_{\text{ок}}$ назначается по соображениям поддержания контакта «электрод–изделие» в нагретом состоянии — $I_{\text{ок}} = 20\text{--}50$ А. Этот ток может создаваться подпиткой. Но полное выключение основного источника на время ограничения не желательно, для того чтобы восстановление ЭДС источника после прекращения прилипания было достаточно быстрым.

1.4.5. Снижение напряжения холостого хода источника

Устройство снижения напряжения УСН (VRD — *Voltage Reduction Device*) предназначено при ручной сварке для уменьшения опасности поражения сварщика электрическим током. Опасность особенно велика в случае длительной работы источника при холостом ходе, когда напряжение между электрододержателем и полом может достигать 80 В у источника переменного тока и 113 В — постоянного тока. Поэтому обязательно комплектование источника устройством снижения (ограничения) напряжения холостого хода для работы в помещениях и средах с повышенной опасностью поражения электрическим током (сырых, влажных, стесненных и т.д.).

Требования к устройствам снижения напряжения холостого хода сформулированы в ГОСТ Р МЭК 60974-1-2012 и ГОСТ 12.2.007.8-75, а также в отраслевых нормах строительных организаций. Приведем наиболее жесткие из них:

- сниженное напряжение холостого хода до $U_{\text{ох}} = 12$ В и менее,
- время срабатывания при включении $t_{\text{вкл}}$ не более 0,06 с,
- время до снижения напряжения при выключении $t_{\text{выкл}}$ не более 1 с,
- чувствительность срабатывания УСН по сопротивлению контакта при касании электродом изделия $R_{\text{сраб}}$ — не хуже 200 Ом.

Проверка возможного влияния УСН на зажигание необходима для обеспечения обязательного и неукоснительного применения УСН. Дело в том, что широкое внедрение простейших УСН ранее сдерживалось негативной реакцией сварщиков, которым задержка при включении УСН затрудняла начальное зажигание. В современных УСН, отвечающих вышеприведенным требованиям, замечания сварщиков учтены.

Для проверки этого утверждения проанализируем процесс зажигания дуги в комплекте «конвенциональный источник постоянного тока + УСН» (рис. 1.16, *а*). В исходном состоянии (интервал 1) УСН поддерживает безопасное сигнальное (не сварочное) напряжение $U_{ox} = 12$ В. С момента 2 касания электродом изделия УСН запускается в работу, и уже через $t_{вкл} = 0,04$ с в момент 3 источник с помощью контактора в составе УСН подает силовое напряжение на нагрузку. Начинается мощное короткое замыкание, а по истечении $t_k = 0,16$ с в результате отвода электрода от изделия с момента 4 возникает дуга. Из-за большой начальной длины дуги 12 мм параметры установившегося к моменту 5 дугового процесса $I_{св} = 120$ А, $U_{св} = 44$ В.

После обрыва дуги в момент 6 устанавливается режим холостого хода с высоким (не сниженным) напряжением $U_x = 80$ В. Высокое напряжение сохраняется для облегчения повторного зажигания, если обрыв произошел случайно. Затем таймер в составе УСН отсчитывает интервал 0,56 с и в момент 7 отключает источник от нагрузки. Еще через 0,04 с УСН с момента 8 снова подает на нагрузку сигнальное напряжение U_{ox} . Таким образом, полное время выключения УСН составило $t_{выкл} = 0,6$ с. Из результатов осциллографирования следует, что УСН не мешает начальному зажиганию, поскольку включается раньше, чем закончится короткое замыкание электродом на изделие ($t_{вкл} < t_k$). Высокое быстродействие современных УСН характеризуется величиной $t_{выкл} < 0,06$ с. Такое время обеспечивают не только тиристорные, но и электромагнитные контакторы в составе современных УСН.

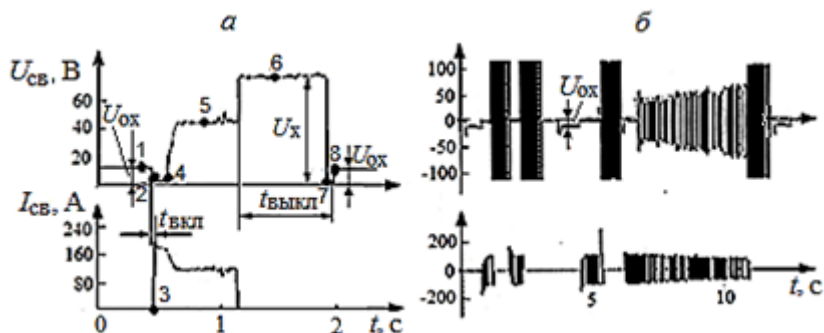


Рис. 1.16 Зажигание и обрыв дуги в штативе с использованием блока снижения напряжения БСН-10: *а* — агрегат АДД-4004М (электрод ОЗС-4 Ø4 мм, 150 А, 26 В); *б* — трансформатор ТДМ-401 (электрод ОЗС-12 Ø2 мм, 70 А, 23 В)

Эксперимент для проверки влияния УСН на зажигание был повторен и для комплекта «источник переменного тока + УСН» (рис. 1.16, *б*). Видно, что зажигание дуги переменного тока произошло только после

четвертого касания. Но в этом нет вины УСН — таков специфический недостаток сварочных трансформаторов. Действительно, при каждом касании ток короткого замыкания сразу принимает максимальное значение — дважды со сниженного напряжения холостого хода и дважды с полного. И в этом случае подтверждено отсутствие негативного влияния УСН на зажигание.

Пример оценки надежности зажигания с установкой автономного блока БСН-10 в сварочные цепи нескольких источников показан в табл. 1.6. Надежность начального зажигания оценивалась по предельной начальной длине дуги в штативе, а также при ручном зажигании по количеству касаний. Для сравнения эксперимент был продублирован без использования УСН. Видна практическая идентичность результатов по оценке надежности зажигания с УСН и без него на различных по принципу действия источниках.

Таблица 1.6.

Надежность зажигания у источников, укомплектованных блоком снижения напряжения БСН-10

Источник		Трансформатор ТДМ-401		Выпрямитель ВД-306М		Агрегат АДД-4004М	
Марка электрода		ОЗС-12	ОЗС-4	ОЗС-12	ОЗС-4	ОЗС-12	ОЗС-4
Диаметр электрода, мм		2	6	2	6	2	6
Сварочный ток, А		70	270	65	270	60	270
Предельная начальная длина дуги, $l_{\text{длпmax}}$, мм	без УСН	7	8	17	15	22	20
	с УСН	6	8	15	15	24	21
Количество касаний $N_{\text{кас}}$	без УСН	5,2	1,5	—	—	—	—
	с УСН	4,2	1,2	—	—	—	—

Снижение частоты вращения сварочного агрегата выполняется с целью экономии горючего, но оно же может вызвать затруднения при зажигании. Например, в состав агрегата АДБ-4004 с бензиновым двигателем УЗАМ-3133 введено реле сброса оборотов. При длительной работе агрегата на холостом ходу (более 1 мин) реле уменьшает подачу горючего, снижая частоту вращения приводного двигателя с номинального значения 3000 об/мин до минимально устойчивого около 1000 об/мин. При этом снижается и напряжение холостого хода вентильного генератора. На осциллограммах рис. 1.17 видно, что в исходном состоянии $U_{\text{ох}} = 15$ В.

В момент касания электродом изделия датчик тока переключил реле сброса на разгон двигателя. Поэтому в первой попытке зажигания в

интервале короткого замыкания ток I_k постепенно нарастал, но за время $t_k = 0,25$ с к моменту отрыва электрода U_x достигло только 30 В, что явно не достаточно для зажигания дуги. Еще через 0,4 с во второй попытке ток короткого замыкания оказался значительно выше. Главное же, напряжение холостого хода достигло значения 52 В, что гарантировало надежное зажигание дуги. Дизельный двигатель разгоняется еще медленней — за 2–3 с.

Для решения проблемы зажигания в таких условиях сварщик слегка корректирует свое поведение — легким сигнальным касанием изделия электродом запускает реле сброса на разгон двигателя, и лишь через несколько секунд начинает сварку.

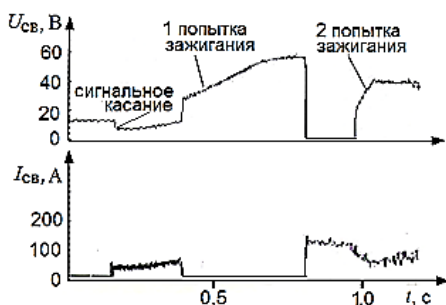


Рис. 1.17. Зажигание дуги при разгоне двигателя (агрегат АДБ-4004, электрод УОНИ 13/55 Ø3 мм, 100 А, 24 В)

2. УСТАНОВЛЕНИЕ ДУГОВОГО ПРОЦЕССА ПРИ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ И АВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРКЕ

2.1. Феноменология установления процесса при дуговой сварке.

2.1.1. Понятие «установление дугового процесса»

Рассмотрим особенности возникновения процесса механизированной сварки с использованием плавящегося проволочного электрода. Разновидности этого способа: сварка в активных защитных газах, таких как CO_2 и смеси на его основе (*MAG*), сварка в инертных газах, таких как Ar и смеси с его преобладанием (*MIG*), а также сварка порошковой проволокой (*FCAW*). Похоже начинается процесс и при автоматической сварке под флюсом (*SAW*). Термин «установление дугового процесса» применительно к этим способам шире понятия «зажигание дуги». Ранее при этих способах скорость и направление подачи проволоки сохранялись неизменными в течение всего процесса сварки. По этой причине зажигание дуги было затруднено. Здесь этапы короткого замыкания, дугового разряда и холостого хода циклически чередовались несколько раз, пока, наконец, не устанавливался устойчивый дуговой процесс.

Установление процесса при сварке в защитном газе шланговым полуавтоматом поясним схематичной кинограммой (рис. 2.1). При одновременном включении источника и подающего механизма проволока разгоняется с небольшой задержкой. В момент приближения проволоки к изделию (позиция 1) в пространстве между ними наблюдается низковольтный импульсный разряд (НИР) в виде кратковременной вспышки. Но при продолжающейся подаче проволока сближается с изделием до образования электрического контакта — возникает режим короткого замыкания (КЗ) с током, многократно превышающим настроенный сварочный. Проволока упирается в изделие, но продолжает подаваться из токоподводящего наконечника. Поэтому горелка реакцией подачи поднимается, а сама проволока на вылете изгибается (поз. 2). Током короткого замыкания проволока в контактах с токоподводящим наконечником и изделием, а также на вылете между ними быстро нагревается и вскоре перегорает (поз. 3). В пространстве между проволокой и ее отделившимся куском («отстрелом») возникает дуговой разряд (ДР), но при большой длине отделившегося куска дуга обрывается (поз. 4) — и устанавливается режим холостого хода (ХХ). Затем сварщик опускает горелку до нового контакта проволоки с изделием, и снова возникает ре-

жим короткого замыкания (поз. 5). Далее описанные процессы повторяются, но новое перегорание происходит на ранее уже подогретом вылете, поэтому дуга зажигается ближе к изделию и следовательно при более короткой длине (поз. 6). Обычно длительно горящая дуга устанавливается после 2–3 перегораний проволоки через 0,2–0,3 с после включения подачи, но в неблагоприятных условиях этот процесс затягивается до 1 с и более.

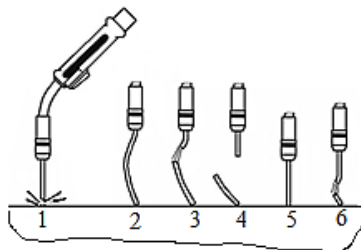


Рис. 2.1. Установление процесса при механизированной сварке

Другой вариант установления процесса наблюдается при автоматической сварке. Здесь токоподводящий наконечник жестко закреплен на сварочном аппарате, поэтому расстояние от токоподвода до изделия при сварке практически не изменяется. Поэтому после утыкания в изделие движение проволоки из наконечника временно прекращается. Это становится возможным благодаря волнообразной деформации проволоки внутри проволокоподающего тракта, частично — из-за притормаживания двигателя, а иногда и за счет проскальзывания проволоки в подающих роликах. После перегорания вылета движение проволоки возобновляется с резким ускорением благодаря распрямлению ее упруго деформированного участка — проволока «выстреливается» из наконечника. Такой эффект может как способствовать, так и препятствовать установлению дугового разряда. При механизированной сварке подобный механизм установления процесса наблюдается, если сварщик жестко контролирует положение горелки и препятствует ее подъему.

Чрезмерная задержка в установлении настроенного режима плохо сказывается на внешнем виде начального участка шва — он покрыт крупными брызгами и кусками проволоки. В работе [27] отмечено, что потери электродного металла при установлении процесса с первого касания составляют около 0,1 г, а с четвертого достигают 0,8 г — более 100 мм сварочной проволоки диаметром 1,1 мм. Задержка отражается и на размерах шва — на начальном участке глубина проплавления, меньше необходимой. Нерегулярные задержки приходится учитывать при выполнении коротких и прерывистых швов, где дефекты начального участка заметно снижают прочность всего сварного соединения.

2.1.2. Этапы установления процесса

Физические явления при установлении процесса рассмотрим в порядке следования этапов: низковольтного разряда, короткого замыкания и дугового разряда.

Этап низковольтного импульсного разряда между сближающимися электродами в условиях сварки детально пояснен в работе [22]. На рис. 2.2 приведены осциллограммы тока и напряжения, иллюстрирующие процесс возникновения НИР и его перехода в дуговой разряд.

При сближении электрода с изделием до расстояния порядка 1 мкм напряженность электрического поля в межэлектродном промежутке достигает пробивной величины — более 10 кВ/мм (возможно, 100 кВ/мм). Параметры разряда зависят от материала катода. Для стальной проволоки при атмосферном давлении пробой возникает даже при напряжении источника 14–20 В. Поэтому авторы работы [22] и назвали это явление низковольтным импульсным разрядом в отличие от высоковольтного, описанного в разд. 3.1. В типичном примере, показанном на рис. 2.2, *а*, для стальной сварочной проволоки в углекислом газе напряжение разряда $U_{\text{НИР}} = 14$ В, а ток $I_{\text{НИР}}$ достигает 0,5 А. Иногда разряд сопровождается взрывом микроконтактов смыкающихся электродов, что способствует увеличению тока.

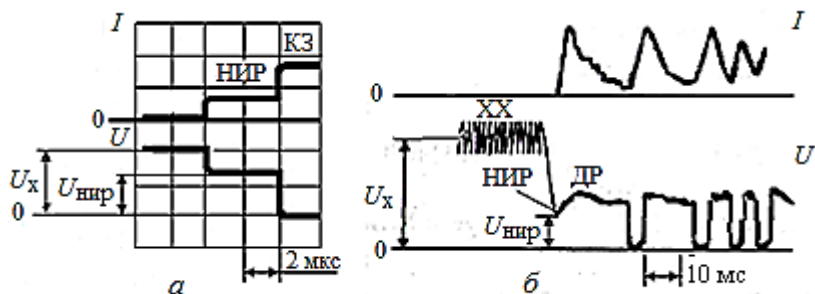


Рис. 2.2. Низковольтный импульсный разряд в условиях сварки ($U_x = 45$ В, $L = 0,04$ мГн): *а* — возникновение и развитие НИР ($U_{\text{НИР}} = 14$ В), *б* — НИР и переход к дуговому разряду ($U_d = 24$ В) [8]

По мере развития НИР его ток увеличивается почти без увеличения напряжения, а торец электрода нагревается, что способствует переходу к ДР. Но одновременно сокращается и расстояние между непрерывно подаваемым электродом и изделием. Желательно, чтобы в течение $t_{\text{НИР}}$ менее 10–100 мкс ток разряда увеличился до значения, достаточного для обеспечения самостоятельного дугового разряда — для стального электрода это 0,8–2 А. В течение последующих 0,3–5 мс необходимо обеспечить форсированное расплавление торца электрода со скоростью,

близкой к скорости подачи, а это уже требует тока в несколько десятков и сотен ампер. На рис. 2.2, б приведен пример успешного перехода от НИР к ДР.

Но обычно зажигание дуги без касания проволокой изделия, только за счет пробоя межэлектродного промежутка и низковольтного импульсного разряда, весьма проблематично. Тем не менее, рассмотрим, что необходимо для установления процесса НИР:

- повышать напряжение холостого хода источника (при увеличении напряжения источника с 22 до 45 В вероятность пробоя и появления НИР повышается от почти 0 до 90 %);

- уменьшать индуктивность сварочной цепи (при снижении индуктивности с 0,7 до 0,04 мГн для уверенного пробоя можно снизить напряжение холостого хода с предельно допустимой при механизированной сварке величины 113 В до типичной для конвенциональных источников величины 40 В).

Этап короткого замыкания может наступить после неуспешного низковольтного импульсного разряда, но обычно возникает в результате непосредственного касания проволокой изделия. Как показано в работе [8], развитие процесса короткого замыкания и переход к этапу дугового разряда связаны с закономерностями нагрева вылета электродной проволоки и нагрева ее контактов с токоподводящим наконечником и изделием. На рис. 2.3 приведены результаты расчета температуры вылета на разных этапах установления процесса.

Как видно на рис.2.3, а, к концу первого касания вылет достигает температуры плавления (для стальной проволоки $T_{пл} \approx 1700$ К). Проволока перегорает вблизи от токоподводящего наконечника — на участке концентрированного тепловыделения с сопротивлением в контакте «наконечник–электрод» $R_{к1}$. К концу следующего за этим интервала обрыва (рис. 2.3, б) остается нагретым не выше 500 К только нижний участок вылета. Далее описанные процессы повторяются, пока, наконец, максимум температуры нагрева не придется на другой участок концентрированного тепловыделения — с сопротивлением в контакте «электрод–изделие» $R_{к2}$ (рис. 2.3, в). Обычно здесь дуга зажигается надежно, поскольку при этом ее длина относительно мала ($l_d < l_{др}$).

Приемы, направленные на ускорение этапа короткого замыкания, должны приводить к увеличению I_k и $R_{к2}$, или к снижению $R_{к1}$.

- 1) С целью увеличения тока короткого замыкания I_k необходимы:

- увеличение напряжения холостого хода источника, желательно только его начального импульса,

- уменьшение наклона внешней характеристики источника,

- уменьшение активного и индуктивного сопротивления сварочной цепи, в частности временное отключение дросселя.

2) С целью увеличения сопротивления в контакте «электрод–изделие» $R_{к2}$ необходимы:

- уменьшение начальной скорости подачи проволоки,
- заострение торца проволоки,
- удаление последней капли при выполнении предыдущего шва (мощным последним импульсом тока или отрывом капли при втягивании проволоки в наконечник).

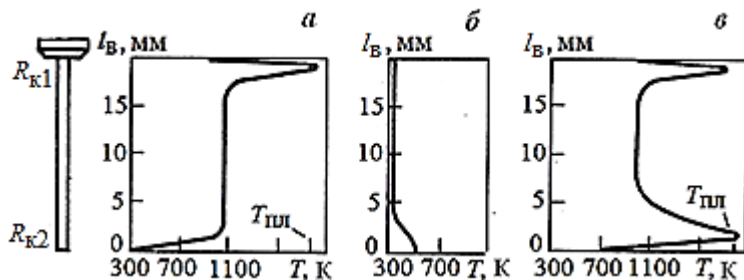


Рис. 2.3. Распределение температуры по вылету электрода:

а — после первого касания электродом изделия, *б* — перед вторым касанием, *в* — после четвертого касания (низкоуглеродистая сталь, $d_3 = 1,6$ мм, $V_{под} = 6,6$ м/мин, $I_{кy} = 900$ А)

3) Для уменьшения сопротивления в контакте «наконечник–электрод» $R_{к1}$ необходимы:

- выбор материала наконечника с высокими электропроводностью и износостойкостью,
- надежное прижатие проволоки к наконечнику или токоподводу (роликовый или колодочный подпружиненный мундштук).

Этап дугового разряда следует искусственно поддерживать воздействиями со стороны источника и подающего механизма, пока разряд не станет непрерывным, а длина дуги не установится на оптимальном уровне. Причем воздействия должны быть различными в зависимости от величины расстояния между электродом и изделием, образовавшегося после короткого замыкания (рис. 2.4).

1) При слишком большой величине межэлектродного промежутка, чтобы не допустить обрыва, необходимо быстро укоротить дугу от начальной длины $l_{дн}$ до установившегося значения $l_{ду}$ (рис.2.4, *а*). Чтобы в начале дугового этапа проволока подавалась быстрее, чем плавилась ($V_{под} > V_{пл}$), используют:

- кратковременное увеличение скорости подачи проволоки,
- стабилизацию сварочного тока выше минимально допустимого уровня $I_{свmin}$.

Во всяком случае, текущее значение l_d должно быть меньше разрывной длины дуги $l_{др}$. С целью увеличения $l_{др}$ необходимо:

- увеличение напряжения источника без увеличения тока, например, с помощью высоковольтной, но маломощной подпитки;
- увеличение индуктивности сварочной цепи (она возвращает дуге энергию, запасенную на предыдущем этапе короткого замыкания).

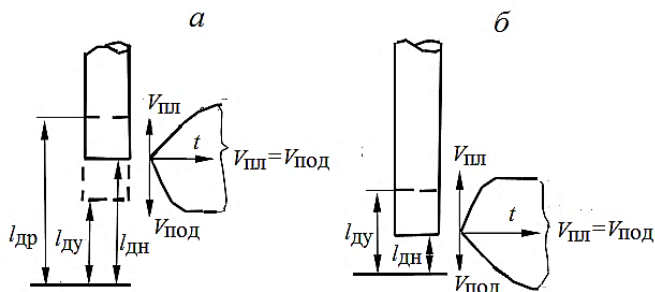


Рис. 2.4. Установление дугового разряда после короткого замыкания при большой (а) и малой (б) начальной длине межэлектродного промежутка

2) При слишком малой величине межэлектродного промежутка, чтобы не допустить закорачивания электрода на изделие, необходимо быстро удлинить дугу от начального значения $l_{дн}$ до установившегося $l_{ду}$ (рис. 2.4, б). Чтобы в начале дугового этапа проволока подавалась медленней, чем плавилась ($V_{под} < V_{пл}$), используют:

- программное ограничение подачи, например, временную остановку или торможение привода подачи только на время установления дуги,
- повышение напряжения и тока источника,
- снижение индуктивности сварочной цепи, например, временным отключением дросселя.

Как видно, на этапе установления дугового разряда приемы, направленные, с одной стороны на предотвращение обрывов дуги, а с другой — на предотвращение закорачиваний проволоки на изделие, противоположны и зачастую взаимоисключающи. Так же обстоит дело и при попытке нахождения компромисса между приемами, обеспечивающими развитие низковольтного импульсного разряда, снижение длительности этапа короткого замыкания и ускорение перехода к устойчивому дуговому разряду. Поэтому в настоящее время среди исследователей и разработчиков оборудования преобладает мнение о том, что существенное улучшение сварочных свойств, в том числе установления процесса, на базе традиционных источников с жесткой внешней характеристикой и подающих механизмов с постоянной скоростью подачи — невозможно.

С появлением же новой элементной базы в виде силовых управляемых вентилей и управляемого привода, а также МП-систем управления стало возможным использование обратных связей по току, напряжению и скорости подачи, а также программного управления этими и другими параметрами. При высоком быстродействии таких источников и подающих механизмов удастся в масштабе реального времени изменять параметры системы «источник–подающий механизм–дуга» по ходу процесса применительно к требованиям текущего этапа (разд. 2.3 и 2.4).

2.1.3. Особенности установления процесса при разных способах сварки

Сварка сплошной проволокой в защитном газе. Типичная осциллограмма установления процесса сварки в углекислом газе при питании от конвенционального источника без специальных функций приведена на рис. 2.5.

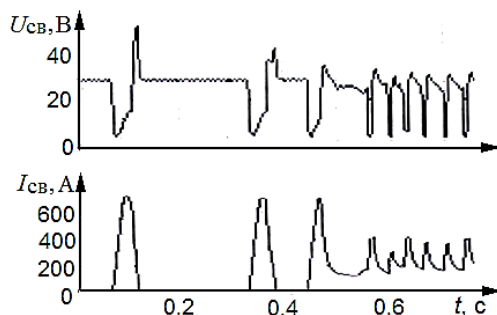


Рис. 2.5. Установление процесса при механизированной сварке в углекислом газе (выпрямитель ВС-420, подающий механизм ПДГ-508М, проволока Св-08Г2С Ø1,2 мм, 200 А, 24 В, 0,35 мГн)

При относительно низком напряжении холостого хода $U_x = 28$ В процесс устанавливается только после нескольких коротких замыканий и обрывов. Как правило, первое замыкание — самое продолжительное и мощное (здесь $I_{кп} = 750$ А), к тому же приводящее к последующему длительному обрыву дуги (здесь более 0,2 с). В данном случае надежный переход к дуговому разряду наступил только после третьего короткого замыкания (или после второго обрыва дуги) через 0,4 с от начала сварки. Последующие частые, но мелкие короткие замыкания, вызываемые капельным переносом электродного металла и характерные для сварки короткой дугой в углекислом газе, возникают позже и к установлению процесса отношения не имеют.

Сварка порошковой проволокой. Зажигание дуги, как правило, происходит с первого касания (рис. 2.6), реже — со второго. При использо-

вании проволоки ПП-АН8 с дополнительной защитой углекислым газом это объясняется введением в сердечник легкоионизируемых компонентов, в частности рутила TiO_2 .

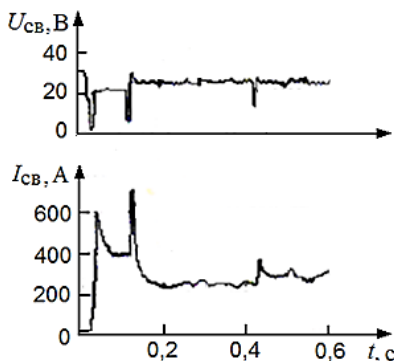


Рис. 2.6. Установление процесса при сварке порошковой проволокой (BC-420 + Урал-4, проволока ПП-АН8 $\varnothing 2,4 \text{ мм}$, 250 А, 23 В)

Автоматическая сварка отличается от ранее рассмотренной механизированной:

- повышенным напряжением холостого хода источника;
- программным управлением подачей электродной проволоки, например, с отводом предварительно закороченного на изделие электрода;
- возможным скользящим движением электрода по поверхности изделия, подобным зажиганию «чирканьем»;
- при сварке под флюсом наличием легкоионизируемых стабилизирующих дуговой разряд компонентов.

Как правило, приведенные обстоятельства способствуют установлению дугового процесса с первого касания (рис. 2.7).

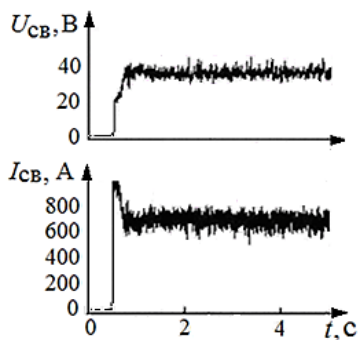


Рис. 2.7. Установление процесса при автоматической сварке под флюсом (ВКСМ-1000 + четыре РБ-301 + А-1416, Св-08 $\varnothing 3 \text{ мм}$, флюс АН-60, 680 А, 35 В)

2.2. Непосредственные критерии установления процесса

2.2.1. Стандартный критерий

Число коротких замыканий или обрывов $N_{обр}$ до установления устойчивого процесса — показатель (критерий), принятый стандартом ГОСТ 25616-83 для источников, используемых при механизированной сварке шланговыми полуавтоматами. Такой критерий считается непосредственным или технологическим, потому что выявляется в процессе сварки. Стандартом предусмотрен объективный метод оценки этого свойства — надежности установления процесса — почти полностью исключающий субъективное воздействие сварщика на процедуру и результат оценки.

Поясним программу и порядок испытания в соответствии с ГОСТ 25616-83.

1) Испытание проводят при наплавке валиков на образцы в нижнем положении автоматом. Если источник конструктивно объединен с автоматом, то испытание выполняют именно в таком комплексе. В случае наплавки полуавтоматом его горелка жестко крепится на тележке передвижного устройства.

2) Испытание производят с автоматической записью тока и напряжения (в настоящее время — с помощью запоминающих осциллографов или цифровых регистраторов).

3) Сварочные автоматы или полуавтоматы, используемые при испытании, должны иметь независимую от напряжения дуги скорость подачи электродной проволоки (требование не вступает в противоречие с достоинствами современных полуавтоматов с программным управлением, поскольку здесь изменения скорости подачи назначаются в функции времени, а не напряжения дуги).

4) Установление процесса проверяется при наплавке не менее пяти валиков, каждый валик наплавляется на чистой поверхности образца с температурой $25 \pm 10^\circ$ (допустима наплавка нескольких валиков на одном образце при условии его охлаждения до этой температуры перед каждой наплавкой).

5) Надежность установления процесса определяют по числу коротких замыканий дугового промежутка или обрывов сварочной дуги, имевших место в процессе начального зажигания дуги до установления стабильного процесса. При этом по показаниям регистрирующих приборов должны быть учтены все короткие замыкания дугового промежутка или обрывы сварочной дуги с момента первого соприкосновения электродной проволоки с образцом до начала того короткого замыка-

ния, после которого процесс продолжается без обрывов сварочной дуги (дословное изложение п. 6.6 ГОСТ 25616-83).

6) Показатель признают удовлетворительным, если среднеарифметическое число коротких замыканий или обрывов не превышает трех.

7) Остальные условия испытания, общие для всех показателей (критериев) сварочных свойств по ГОСТ 25616-83, изложены во Введении, а режимы наплавки приведены в табл. В.4.

В упрощенном (не стандартном) варианте установление процесса оценивают при ручном удержании горелки на месте, т.е. без сварочного перемещения. Сварщик устанавливает горелку с вертикальным расположением проволоки на расстоянии 1–2 мм над образцом и нажатием кнопки на горелке запускает полуавтомат, а при установлении процесса старается сохранить настроенное значение вылета. Несмотря на неточное следование стандартной процедуре, упрощенная методика применяется чаще. И дело не только в легкости ее реализации — она к тому же лучше соответствует типичной практике сварки. Экспериментальное сравнение двух методик — стандартной с использованием сварочного автомата и упрощенной с ручным удержанием горелки — дает практически одинаковые результаты по числу обрывов $N_{обр}$.

Рассмотрим пример расшифровки записей регистрирующего прибора — запоминающего осциллографа — при оценке установления процесса по упрощенной методике (см. рис. 2.11 в разд. 2.3.2). На рис. 2.11, *а* число коротких замыканий, так же как и обрывов $N_{обр} = 6$ (последнее короткое замыкание, перешедшее в дуговой процесс, в счет не идет). Здесь результат оценки установления процесса – по единственной попытке, что не соответствует ГОСТу – неудовлетворительный. На рис. 2.11, *б* число коротких замыканий и обрывов по 2 — результат этой попытки удовлетворительный. На рис. 2.11, *в* первое же касание перешло в дуговой разряд без обрывов ($N_{обр} = 0$) — в этой попытке естественно, удовлетворительный результат, но также не соответствующий стандарту из-за недостаточного количества экспериментов.. И только если среднее значение числа обрывов при достаточном количестве попыток менее 3 (например, среднее $N_{обр}$ из 6, 3, 3, 2 и 0, равное 2,8) — общий результат испытания удовлетворительный.

В табл. 2.1 сведены результаты испытаний нескольких источников по упрощенной методике. Результаты, выделенные жирным шрифтом, неудовлетворительные ($N_{обр} = 4,2 > 3$), остальные — удовлетворительные.

2.2.2. Нестандартные критерии

Длительность установления процесса $t_{уст}$ — критерий, по технологическому содержанию близкий к описанному выше числу обрывов $N_{обр}$. Ясно, что при увеличении $N_{обр}$ увеличивается и общая длитель-

ность установления процесса. Последний критерий к тому же полезней для учета задержки начала сварки, а также для проектирования систем программного управления. Измерение длительности выполняется с помощью таких же регистрирующих устройств и при тех же условиях, которые оговорены выше для $N_{обр}$.

Таблица 2.1.

Непосредственные критерии установления процесса при механизированной сварке в углекислом газе (число обрывов $N_{обр}$ и длительность установления процесса $t_{уст}$)

Диаметр электрода, мм	0,8		1,0	1,2			1,6	
Скорость подачи проволоки, м/мин	3,8	5,0	6,6	3,5	6,2	7,9	5,8	9,8
Сварочный ток, А	70	100	150	140 вертикальное	200	250	300	400
Сварочное напряжение, В	18	19	22	22	24	26	29	34
Индуктивность дросселя, мГн	0,2		0,3	0,4			0,5	
Выпрямитель ВС-420	$N_{обр}$	4,2	4,2		0,6	1,4		0,2
	$t_{уст}, c$		0,32		0,16	0,25		0,12
Выпрямитель ВДУ-306МТ	$N_{обр}$	2,5	1,7	0,6	0,8	0,5	0,2	1,0
	$t_{уст}, c$		0,3			0,1		0,1
Выпрямитель ВДУ-506МТ	$N_{обр}$		1,0	1,1	2,0	0,8	1,2	1,0
	$t_{уст}, c$					0,1		
Выпрямитель ВДУ-506М	$N_{обр}$		0,6			2,0		2,6
	$t_{уст}, c$		0,45			0,45		1,2
Выпрямитель ВД-506ДК	$N_{обр}$					2,4		0,8
	$t_{уст}, c$					0,33		0,21

Примечания:

- 1) Выпрямитель ВС-420 с витковой настройкой в комплекте с подающим механизмом Урал-3 с плавным разгоном подачи.
- 2) Тиристорный выпрямитель ВДУ-306МТ с подпиткой в комплекте с подающим механизмом ПДГО-512 с плавным разгоном подачи.
- 3) Тиристорный выпрямитель ВДУ-506МТ с подпиткой в комплекте с подающим механизмом ПДГО-510 с плавным разгоном подачи.
- 4) Тиристорный выпрямитель ВДУ-506М с подпиткой в комплекте с подающими механизмами ПДГ-253 и ПДГ-508М.
- 5) Тиристорный выпрямитель ВД-506ДК с подпиткой и дросселем 1,7 мГн в комплекте с подающим механизмом ПДГ-508М.

Приведем примеры расшифровки осциллограмм для определения $t_{уст}$ (рис. 2.8). Для тиристорного выпрямителя ВД-506ДК при сварке

проволокой диаметром 1,2 и 1,6 мм длительность $t_{уст}$ соответственно 0,34 и 0,22 с. Для тиристорного выпрямителя ВДУ-506М при сварке такими же проволоками длительность $t_{уст}$ соответственно 0,435 и 0,44 с.

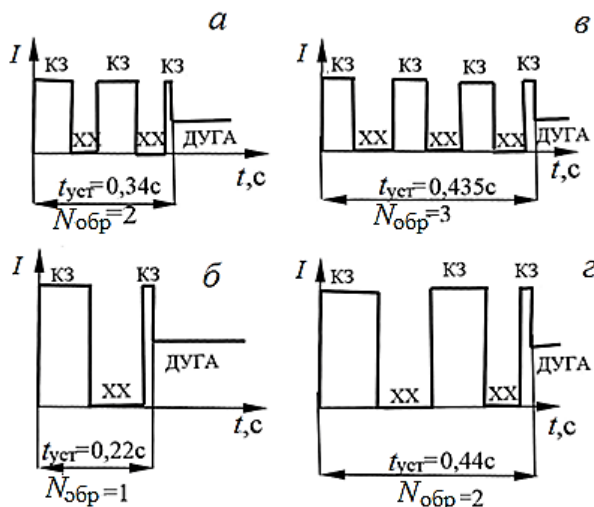


Рис. 2.8. Этапы установления процесса: а — выпрямитель ВД-506ДК с высоковольтной подпиткой с подающим механизмом ПДГ-508М, проволока Св-08Г2С Ø1,2 мм, 150 А; б — то же, Ø1,6 мм, 300 А; в — выпрямитель ВДУ-506М + ПДГ-508М, проволока Св-08Г2С Ø1,2 мм, 150 А; г — то же, Ø1,6 мм, 300 А

В табл. 2.1 приведены статистически достоверные (средние из 5 или более попыток) результаты измерения $t_{уст}$ для разных источников. Сопоставив значения $t_{уст}$ со значениями $N_{обp}$, более строго регламентированной в ГОСТ 25616-83 величины ($N_{обp} \leq 3$), можно допустимым значением длительности установления процесса принять $t_{уст} \leq 0,5$ с.

Интеграл действия тока короткого замыкания A_K — непосредственный критерий, пропорциональный количеству теплоты, затраченной на перегорание проволоки на этапе короткого замыкания

$$A_K = \int_0^{t_K} I_K^2 dt.$$

В работе [23] показана его высокая стабильность при перегорании проволоки на вылете вдали как от контакта с изделием, так и с токоподводом (см. рис. 2.1). Так, для стальной проволоки Ø1,14 мм при среднем значении $A_K = 11500 \text{ А}^2\text{с}$ его среднеквадратическое отклонение составляет всего

336 А²с, т.е. менее 3 %. В случае же перегорания проволоки в контакте с изделием эта величина существенно меньше, хотя и отличается большим разбросом — для этого же электрода от 20 до 2110 А²с. Особенно низкие значения интеграла получаются при заострении конца проволоки. Чем ниже интеграл, тем более плавно короткое замыкание переходит затем к дуге — с меньшим количеством брызг и «отстрелов» проволоки.

2.3. Косвенные критерии установления процесса

К косвенным критериям относятся электрические параметры источников — напряжение холостого хода U_x , наклон внешней характеристики ρ_n (или сопротивление R_n), индуктивность сварочной цепи L , а для современных источников также параметры комбинированной внешней характеристики. Также к косвенным критериям следует отнести параметры подающего механизма — скорость подачи $V_{\text{под}}$ электродной проволоки, и график ее изменения во времени. Покажем физические зависимости установления процесса от этих характеристик.

2.3.1. Математическое описание установления процесса

Этап короткого замыкания описывается уравнением для тока, полученным из (1.1), но с учетом сопротивления $R_{\text{вн}}$ внешней сварочной цепи, которое в данном случае сопоставимо с сопротивлением источника R_n —

$$I_k(t) = \frac{U_x}{R_n + R_{\text{вн}}} (1 - e^{-\frac{R_n + R_{\text{вн}}}{L} t}). \quad (2.1)$$

Установившееся значение тока короткого замыкания можно определить из уравнения

$$I_{\text{ку}} = \frac{U_x}{R_n + R_{\text{вн}}}. \quad (2.2)$$

а скорость его нарастания из уравнения

$$dI_k / dt = \frac{U_x}{L} e^{-\frac{R_n + R_{\text{вн}}}{L} t} \quad (2.3)$$

Как правило, хотя и не всегда, для надежного установления процесса необходимо уменьшать длительность короткого замыкания. Это требует увеличения тока короткого замыкания, а также скорости его нарастания. Как видно из (2.2) и (2.3), это достигается увеличением U_x или снижением сопротивлений источника R_n и внешней сварочной цепи $R_{\text{вн}}$, а также снижением индуктивности L .

Этап перехода к дуговому разряду описан в большом количестве фундаментальных работ [8, 23-25, 160]. Примем в качестве основы для

математического описания процесса работу [26]. Если на этапе дугового разряда пренебречь возмущениями, вносимыми капельным переносом, а также колебаниями вылета электрода, то получим закон установления длины дуги l_d в виде дифференциального уравнения:

$$T_1 T_2 \frac{d^2 \Delta l_d}{dt^2} + T_2 \frac{d \Delta l_d}{dt} + \Delta l_d = l_{ду} - l_{дн}, \quad (2.4)$$

где T_1 и T_2 — постоянные времени, причем $T_1 T_2 = \frac{L}{\varepsilon_{ст} k_{ст}}$ и $T_2 = \frac{\rho_d - \rho_{и} + R_{вн}}{\varepsilon_{ст} k_{ст}}$.

Установившееся значение длины дуги по завершении аperiodического переходного процесса

$$l_{ду} = [U_x - U_{ка} - \frac{V_{под}(\rho_d - \rho_{и} + R_{вн})}{k_{ст}}] / \varepsilon_{ст}. \quad (2.5),$$

где $\varepsilon_{ст}$ — градиент потенциала в столбе дуги,

$k_{ст}$ — коэффициент саморегулирования по току (подробней в разд. 4.3).

В обоих вариантах развития дугового процесса, описанных в разд. 2.1.2, как при большом начальном значении межэлектродного промежутка $l_{дн}$, образовавшегося после перегорания электродной проволоки (рис. 2.4, а), так и при малом (рис. 2.4, б), успешным результатом является достижение одной и той же длины $l_{ду}$, заданной настройкой U_x и $V_{под}$. Таким образом, необходимо по уравнению (2.5) согласовывать между собой значения U_x и $V_{под}$, чтобы не допустить ни нового короткого замыкания, ни обрыва. Поэтому желательно, чтобы по окончании переходного процесса длина дуги устанавливалась вблизи середины интервала — $0 < l_{ду} < l_{др}$.

Из уравнения (2.4) также следует, что для быстрого установления дугового процесса необходимо уменьшать постоянные времени T_1 и T_2 , а это достигается снижением индуктивности L и наклона внешней характеристики $|\rho_{и}|$.

Переходные процессы по току $I_d(t)$ и напряжению $U_d(t)$ описаны в разд. 4.3.2 и 6.4.2.

2.3.2. Электрические параметры оборудования, влияющие на установление процесса

Напряжение холостого хода источника — наиболее важный из всех косвенных критериев установления процесса. Известные значения U_x у конвенциональных источников для механизированной сварки в углекислом газе находятся в интервале от 15 до 60 В, а у современных источников — от 12 до 113 В (при сварке в аргоне от 8 В). У источников для автоматической сварки максимально допустимое $U_x = 141$ В. Как следует из вышеприведенных формул (2.1–2.5), практически в любом варианте и на любом этапе для повышения надежности

установления процесса полезно увеличение напряжения холостого хода. Но ограничения на величину U_x могут возникнуть для удовлетворения других требований, таких как характеристики переноса электродного металла и формирования шва.

Рассмотрим требования к U_x с точек зрения:

— обеспечения рационального соотношения между $I_{сву}$ и $U_{сву}$ уже в установившемся процессе сварки,

— сокращения длительности короткого замыкания,

— надежного установления дуги.

1) Соотношение между напряжением и током при механизированной сварке в углекислом газе $U_{сву} = 14 + 0,05I_{сву}$ регламентировано в ГОСТ 60974-1-2012 [20]. В свою очередь, оно обеспечивает оптимальное соотношение между шириной шва и глубиной проплавления, а также способствует качественному переносу электродного металла. При использовании источника с жесткой (пологопадающей) характеристикой настройка $U_{сву}$ выполняется изменением U_x , поэтому с учетом падения напряжения на сопротивлении источника $R_{и}$ и внешней сварочной цепи $R_{вн}$ (сварочные провода, обмотка дросселя и т.д.)

$$U_x = 14 + 0,05I_{сву} + (R_{и} + R_{вн})I_{сву}. \quad (2.6)$$

В табл. 2.2 приведено несколько режимов, рекомендованных в ГОСТ 25616-83 для испытания источников при механизированной сварке в углекислом газе, а также соответствующее им по уравнению (2.6) значение U_x при условии $R_{и} + R_{вн} = 0,04$ Ом. Полученные значения напряжения холостого хода от 21 до 50 В вполне отвечают типичным диапазонам настройки U_x у конвенциональных источников для механизированной сварки.

2) Для сокращения длительности короткого замыкания у конвенционального источника можно принять такое условие, чтобы установившийся ток короткого замыкания превышал настроенный сварочный в 3 раза ($I_{кз} = 3I_{сву}$). Достаточное для этого из (2.2) напряжение холостого хода

$$U_x = 3(R_{и} + R_{вн})I_{сву} \quad (2.7)$$

для тех же условий составляет от 8 до 48 В. Поэтому настроенные для сварки значения $U_x = 21-50$ В у источников с пологопадающей характеристикой с гарантией обеспечивают при коротком замыкании выполнение даже условия $I_{кз} = (3-5)I_{сву}$. Но реально столь высокие значения I_k наблюдаются редко, поскольку процесс короткого замыкания из-за перегорания проволоки заканчивается раньше достижения установившегося состояния.

Таблица 2.2.

Выбор напряжения холостого хода источника для механизированной сварки в углекислом газе по различным требованиям

Режим сварки	Диаметр электрода, мм	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6
	Сварочный ток $I_{сву}$, А	70	150	200	300	400
	Сварочное напряжение $U_{св}$, В	18	22	24	29	34
	Вылет электрода l_v , мм	7	10	15	18	20
Напряжение холостого хода U_x , В	— для обеспечения стандартного соотношения между $I_{сву}$ и $U_{сву}$ при сварке (2.6)	21	28	32	41	50
	— для сокращения короткого замыкания (2.7)	8	18	24	36	48
	— для установления дугового процесса (2.8)	48	58	73	84	92

3) Для надежного установления дугового процесса после перегорания проволоки необходимо более высокое напряжение холостого хода. Экспериментально определялось [8] напряжение U_n , достаточное для установления дугового процесса в зависимости от начального расстояния $l_{дн}$ между проволокой и изделием (рис. 2.9). При соосном расположении дуги с электродом это напряжение (линия 1) довольно точно отвечает соотношению $U_n = U_{ка} + \epsilon_{ст} l_{дн}$ (если для сварки в углекислом газе стальной проволокой принять из [12] $U_{ка} = 18$ В и $\epsilon_{ст} = 2,6$ В/мм).

Для другого случая, когда дуга отклоняется от оси электрода, напряжение придется увеличить на 10 В (линия 2) — $U_n = U_{ка} + \epsilon_{ст} l_{дн} + 10$. Если учесть следующие неблагоприятные факторы: перегорание проволоки произошло вблизи от кончика, а дуга не соосна электроду, то достаточное значение напряжения холостого хода с учетом падения напряжения на сопротивлениях источника R_n и внешней сварочной цепи $R_{вн}$ можно определить из соотношения

$$U_x = U_{ка} + \epsilon_{ст} l_v + (R_n + R_{вн}) I_{сву} + 10. \quad (2.8).$$

Приняв $R_n + R_{вн} = 0,03$ Ом, получаем U_x от 48 до 92 В. Поэтому конвенциональные источники с более низким напряжением холостого хода от 15 до 60 В не гарантируют быстрого установления дугового процесса.

Итак, в конвенциональном источнике за счет только ступенчатой настройки режима невозможно качественное выполнение трех требований в отношении U_x .

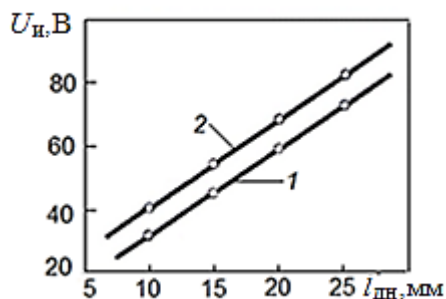


Рис. 2.9. Напряжение, необходимое для установления дугового процесса, в зависимости от длины межэлектродного промежутка: 1 — дуга соосна с электродом, 2 — дуга отклоняется от оси (проволока Св-08Г2С, CO_2)

В современных же источниках, построенных на управляемых силовых вентилях — тиристорах и транзисторах — удовлетворяется одновременно или последовательно несколько требований, в том числе и для повышения надежности установления процесса за счет:

- использования комбинированных внешних характеристик (с высоковольтной подпиткой);
- программного управления напряжением холостого хода в функции времени (горячий пуск),
- быстрого изменения U_x в системах с обратными связями по току и напряжению в ответ на отклонения процесса установления дуги от оптимального (например, за счет стабилизации сварочного тока $I_{св}$).

Наклон внешней характеристики ρ_n (или активное сопротивление R_n конвенционального источника) — менее распространенный косвенный критерий установления процесса. Судя по уравнениям (2.1–2.5), для повышения надежности установления процесса на обоих этапах полезно уменьшение наклона. Поэтому приведенные в ГОСТ 60974-1-2012 значения ρ_n от 0 до $-0,07 \text{ В/А}$ можно считать приемлемыми и для надежного установления процесса. Отметим также необходимость учета сопротивления $R_{вн}$ внешней сварочной цепи. При большой длине и малом сечении сварочных проводов величина $R_{вн}$ становится сопоставимой с R_n , что может затруднить установление процесса.

Индуктивность сварочной цепи L с учетом индуктивности сглаживающего дросселя — другой косвенный критерий для оценки надежности установления процесса, но уже не столь однозначный, как напряжение холостого хода или наклон внешней характеристики. Причина в том, что, например, уменьшение индуктивности хотя и способствует развитию низковольтного импульсного разряда, а также интенсифика-

ции короткого замыкания, но затем это уменьшение может навредить развитию дугового разряда.

На осциллограммах тока (рис. 2.10) можно убедиться в пользе от увеличения индуктивности дросселя от 0,2 до 0,38 мГн, но только в конкретном случае сварки проволокой диаметром 1,2 мм при скорости подачи 3 м/мин. При малой индуктивности (рис. 2.10, а) после короткого замыкания ток снижается слишком быстро, что и приводит к обрыву дуги ($N_{обр} = 1$). Поэтому для надежного установления дугового процесса понадобилось второе короткое замыкание, так что общая длительность $t_{уст}$ затянулась до 0,4 с. А при большой индуктивности (рис. 2.10, б) зажигание дуги произошло с первого касания ($N_{обр} = 0$), потому что более медленный спад сварочного тока способствовал поддержанию дуги.

Индуктивность собственно источника относительно невелика и связана с индуктивностью рассеяния силового трансформатора — от 0,05 до 0,5 мГн. Обязательно подлежит учету индуктивность сварочных проводов — не менее 0,04 мГн [16]. Но при их большой длине и особенно при увеличении площади охватываемого ими контура и включении в него ферромагнитных масс индуктивность внешнего сварочного контура может достигать 1 мГн. Большую же часть, конечно, составляет индуктивность специального дросселя — от 0,1 до 1,7 мГн. Основное назначение дросселя — это управление переносом электродного металла, особенно при сварке с технологическими короткими замыканиями.

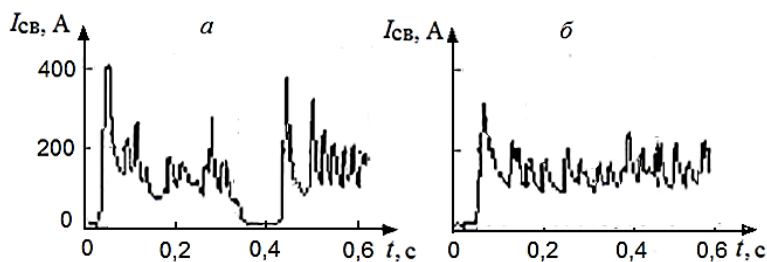


Рис. 2.10. Установление процесса в зависимости от индуктивности дросселя: а — 0,2 мГн, б — 0,38 мГн (выпрямитель ВС-420, полуавтомат Урал-3, проволока Св-08Г2С Ø1,2 мм, 140 А, 22 В)

Оптимальные значения индуктивности дросселя для выполнения этой функции зависят от диаметра электродной проволоки — по упрощенному уравнению $L_{др} [\text{мГн}] = (0,3-0,4)d_s [\text{мм}]$ (подробней в разд. 6.3 и 8.3). В эксперименте (табл. 2.3) была проверена надежность установления процесса при небольшом варьировании величины индуктивности вблизи значений, определенных по этому уравнению. Даже без включения подпитки надежность удовлетворительная ($N_{обр} = 2,0-3,2$).

Таким образом, значения индуктивности, принятые для оптимизации переноса электродного металла, могут считаться приемлемыми и при установлении процесса. Тем не менее, укажем приемы воздействия на установление процесса со стороны индуктивности сварочной цепи:

- временное выключение дросселя на этапе короткого замыкания [36];
- программное изменение индуктивности по ходу процесса: например, малая — на этапе короткого замыкания, большая — на этапе установления дуги, оптимизированная по условиям переноса — в установившемся процессе.

Таблица 2.3.

Зависимость установления процесса от индуктивности дросселя и наличия подпитки (тиристорный выпрямитель ВДУ-506М)

Диаметр электрода,мм	0,8	1,2	1,6					
Режим сварки: ток, А, напряжение, В	100 21	200 26	285 28	385 35				
Скорость подачи проволоки, м/мин	5	6,2	5,6	8,3				
Напряжение холостого хода основного источника $U_{х2}$, В	25	32	38	50				
Вылет проволоки, мм	7	15	18	20				
Число обрывов $N_{обр}$								
Резисторная подпитка ($U_{х1} = 95$ В, $I_{к1} = 47$ А)	есть	нет	есть	нет	есть	нет	есть	нет
Индуктивность дросселя $L_{др}$, мГн	0,22	0,6	5,8					
	0,48	0,8	2,4	2,0	3,2			
	0,60					2,6	2,6	
	0,72			4,0	3,1			0,6
	1,35					2,2	2,0	2,2

Примечание: жирным шрифтом отмечены неудовлетворительные результаты ($N_{обр} > 3$)

Высоковольтная подпитка — вспомогательный маломощный источник, питающий дугу параллельно основному. Как и при ручной сварке, она предназначена для заполнения пауз в токе основной силовой цепи источника в установившемся режиме. Но при механизированной

сварке подпитка может вступать в действие и на этапе установления дугового процесса. Причем для ее запуска в работу на нагрузку не нужны ни датчики состояния дуги, ни коммутационные устройства. Она срабатывает самопроизвольно, мгновенно начиная питать дугу с того момента, когда напряжение основного источника становится для этого недостаточным.

Полезное действие подпитки эффективно проявляется при сравнении осциллограмм тока на рис. 2.11, полученных при сильной пульсации тока у основного тиристорного выпрямителя на низких режимах (100 А, 21 В, коэффициент пульсации тока 0,32). На рис. 2.11, а показан неудовлетворительный вариант установления процесса без подпитки ($N_{обр} = 6$). На рис. 2.11, б, полученном при сварке с подпиткой, содержащей балластный реостат с активным сопротивлением 2 Ом), результат удовлетворительный ($N_{обр} = 2$). Видно, что после второго обрыва короткое замыкание перешло в дуговой процесс, поддерживаемый только подпиткой при токе 40 А, после чего дугу подхватил основной источник при токе 60–100 А. Еще лучше (рис. 2.11, в) действует конструкция с дросселем 6,5 мГн, установленным в цепи переменного тока подпитки ($N_{обр} = 0$).

В табл. 2.3 выполнено сравнение установления процесса при наличии и отсутствии подпитки в широком диапазоне режимов от 100 до 385 А. Число обрывов при использовании подпитки $N_{обр} = 0,6$ –2,6, тогда как без подпитки $N_{обр} = 2,0$ –5,8. Исключение составляет только один режим с явно завышенной индуктивностью дросселя, которую не смогла компенсировать даже подпитка (проволока Ø 1,2 мм, $L_{др} = 0,72$ мГн, $N_{обр} = 4,0$).

С другой же стороны, подпитка позволила решить трудную задачу надежного установления процесса на малом токе при низкой индуктивности (проволока Ø 0,8 мм, 100 А, 0,22 мГн, с подпиткой $N_{обр} = 0,6$, без подпитки — 5,8).

Конструктивное оформление высоковольтной подпитки возможно в следующих вариантах:

- отдельный маломощный выпрямитель (трехфазный понижающий трансформатор с увеличенным рассеянием и диодный блок), ток подпитки обычно не настраивается и задается индуктивностью рассеяния трансформатора (см. рис. 6.8, в);

- объединенный с основным источником выпрямитель (дополнительные обмотки повышенного напряжения на основном трансформаторе, диодный блок, балластный реостат), ток подпитки настраивается коммутацией секций балластного реостата от 2 до 10 Ом;

- объединенный с основным источником выпрямитель (дополнительные обмотки на основном трансформаторе, трехфазный дроссель, диодный блок), ток подпитки настраивается индуктивностью дросселя;

— умножитель напряжения (конденсаторная батарея, включенная параллельно с основным источником), батарея заряжается до удвоенного амплитудного напряжения вторичной обмотки и разряжается на дугу в начале сварки;

— формирование крутопадающей характеристики для участка высоковольтной подпитки за счет основного источника с фазовым или частотным регулированием, в этом случае необходимо обеспечить быстрый переход от режима короткого замыкания к режиму высоковольтной подпитки, а затем к настроенному режиму сварки.

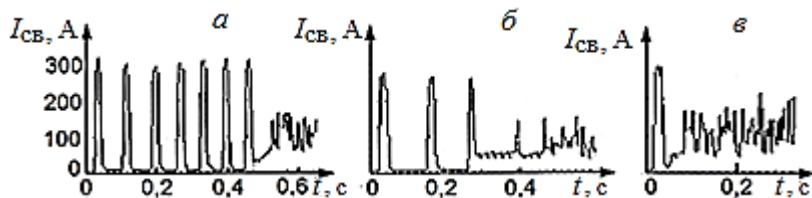


Рис. 2.11. Установление процесса: а — без подпитки, б — с резисторной подпиткой, в — с индуктивной подпиткой
(выпрямитель ВДУ-506М с полуавтоматом ПДГ-253, проволока Св-08Г2С Ø0,8 мм, 100 А, 21 В)

Низковольтная подпитка — это мощный вспомогательный выпрямитель, подключенный на нагрузку параллельно основному источнику. Ее главное назначение — поддержание устойчивого процесса и стимулирование переноса капель при сварке с технологическими короткими замыканиями (см. разд. 4.5.3 и 8.4.2). Но здесь отметим участие низковольтной подпитки в установлении процесса. На этапе дугового разряда она заперта более высоким напряжением основного источника, а на этапе короткого замыкания вступает в работу, добавляя в нагрузку энергию для ускорения разрыва цепи короткого замыкания.

Комбинированная внешняя характеристика у современного источника для механизированной сварки имеет четыре участка (рис. 2.12). Но при визуальном сходстве с рис. 1.10 параметры и назначение участков не совпадают с приведенными в разд. 1.3.2 для ручной сварки. Оценим роль отдельных участков в ходе установления процесса механизированной сварки. Падающий участок высоковольтной подпитки 1 имеет напряжение холостого хода $U_{x1} = 60\text{--}113$ В и ток короткого замыкания $I_{к1} = 10\text{--}50$ А. Высоковольтная подпитка наиболее полезна сразу после этапа короткого замыкания, когда она вместе с основным источником поддерживает дугу до установления ее стабильной длины. Жесткий участок 2 сформирован основной силовой частью источника с напряжением холостого хода U_{x2} не более 50 В. Пересечением участка 2 с харак-

теристикой системы саморегулирования (АРДС) в точке A задаются параметры установившегося режима — напряжения $U_{\text{ду}}$ и тока $I_{\text{ду}}$. Участок отсечки 3 ограничивает длительное максимальное значение тока источника, и при установлении процесса обычно не используется. Низковольтная подпитка с участком 4 ($U_{\text{x4}}=10\text{--}15\text{ В}$, $I_{\text{к4}}=100\text{--}300\text{ А}$ дополнительно к току $I_{\text{к}}$ основного источника) при установлении процесса самопроизвольно (без управляющих команд) вступает в действие при замыкании электрода на изделие и выходит из работы при возникновении дуги.

В процессе установления дугового разряда рабочая точка, отражающая текущее состояние системы, перемещается по траекториям, изображенным штриховыми линиями, направленными к т. A .

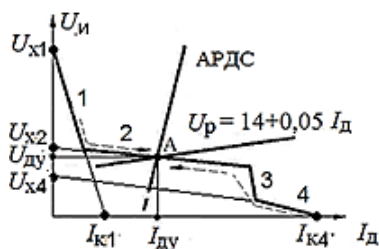


Рис. 2.12. Комбинированная внешняя характеристика источника для механизированной сварки с траекториями установления процесса

2.3.3. Неэлектрические параметры оборудования, влияющие на установление процесса

Скорость подачи электродной проволоки $V_{\text{под}}$ — косвенный критерий, характеризующий надежность установления процесса со стороны привода. По ГОСТ 18130-79 и ГОСТ 8213-73 скорость подачи настраивается в интервале 1–20 м/мин. Диапазон настройки $V_{\text{под}}$ обычно приводится в технической документации подающего механизма. Но для аппаратов с постоянной скоростью подачи возможно и экспериментальное определение $V_{\text{под}}$ за счет фиксирования длины и времени подачи куска проволоки без включения источника.

К сожалению, этот критерий не однозначен по своему влиянию на ход и результат переходных процессов. При увеличении $V_{\text{под}}$ возрастает начальный ток короткого замыкания, к чему следовало бы стремиться для интенсификации электрических процессов на первом этапе. Но чрезмерное расплавление вылета может привести к образованию слишком длинной дуги и вызвать прерывание дугового разряда на втором этапе. Установление процесса при малой скорости подачи менее проблематично. Чтобы снижение скорости не отразилось на производи-

тельности сварки, к конвенциональному источнику в настоящее время придают более сложный подающий механизм с плавным разгоном. Такой механизм обеспечивает малую скорость $V_{\text{под}}$ при коротком замыкании и большую скорость — с начала дугового процесса.

На рис. 2. 13 приведен пример удачного начала сварки — короткое замыкание началось при $V_{\text{нач}} = 3,8$ м/мин, а дуговой процесс — при скорости 6,2 м/мин, что и привело к установлению процесса с первого касания ($N_{\text{обр}} = 0$) [23]. В этом примере по показаниям тахометра, измеряющего линейную скорость перемещения проволоки, установившаяся скорость подачи $V_{\text{под}} = 7,6$ м/мин, время разгона $t_{\text{раз}} = 0,1$ с, а ускорение подачи $1,5$ м/с². Более плавный разгон дает еще больший эффект, поэтому в современных приводах с коллекторными двигателями время разгона $t_{\text{раз}}$ настраивается от 0,1 до 2 с.

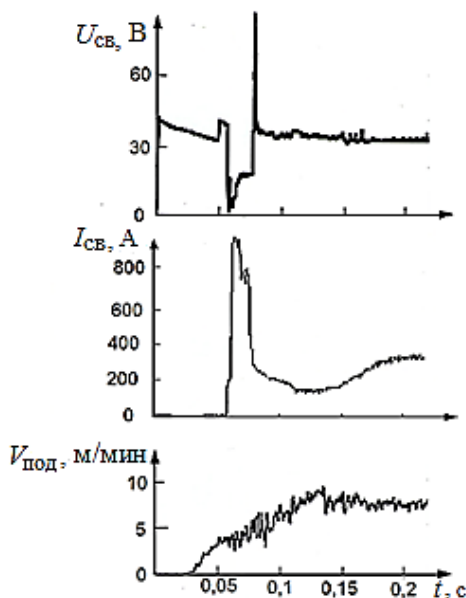


Рис. 2.13. Установление процесса с естественным разгоном привода подачи (выпрямитель Hobart Megapulse 450, проволока E70S-6, Ø1,14 мм, 7,6 м/мин, 32 В, Ar+10 % CO₂) [23]

Итак, использование скорости подачи электродной проволоки в качестве косвенного критерия надежности установления процесса имеет смысл только в сочетании с характеристиками ее программного изменения — начальной скорости в момент касания $V_{\text{нач}}$, длительности разгона подачи $t_{\text{раз}}$ и др. (см. разд. 2.4.3).

2.4. Специальные функции для улучшения установления процесса

Повышение надежности установления процесса на базе современного сварочного оборудования обеспечивается средствами автоматического, в том числе программного, управления источником, дросселем и подающим механизмом.

2.4.1. Программное управление источником и дросселем на этапе короткого замыкания

Горячий пуск — электротехнический прием, заключающийся в кратковременном начальном увеличении тока короткого замыкания, которое способствует установлению процесса с первого касания.

Параметры горячего пуска — это ток $I_{гп}$ и длительность $t_{гп}$, а также начальное напряжение источника $U_{х.нач}$. В современных источниках начальное напряжение устанавливают в 1,15–1,25 раза больше настроенного сварочного $U_{сву}$. Точная настройка $I_{гп}$ не возможна из-за скорости первого короткого замыкания.

С помощью осциллограмм тока на рис. 2.14 поясним выбор параметров горячего пуска. При использовании тиристорного выпрямителя ВДУ-306МТ по умолчанию $U_{х.нач} = U_{сву} + 5$ В, поэтому программное управление ограничивалось только настройкой длительности $t_{гп}$. При этом учтем, что реальное значение t_k будет несколько больше $t_{гп}$, настроенного с помощью тиристорного блока. Без горячего пуска (рис. 2.14, а) начальный импульс короткого замыкания имел амплитуду 400 А и время 0,02 с, после чего пошло установление дугового процесса с сильными пульсациями тока ($N_{обр} = 1$).

При горячем пуске с настроенной длительностью $t_{гп} = 0,01$ с (рис. 2.14, б) в начальном импульсе амплитуда тока увеличилась до 500 А, а фактическое время короткого замыкания — до 0,05 с. При этом максимум тепловыделения приходится на место контакта электрода с изделием, где и происходит перегорание проволоки. К тому же и на этапе развития дугового процесса высокое начальное значение тока облегчает удержание дуги до момента, когда скорости плавления и подачи уравниваются. Поэтому дуговой процесс устанавливается с первого касания ($N_{обр} = 0$).

Но при дальнейшем увеличении длительности до $t_{гп} = 0,03$ с преобладает уже негативный эффект горячего пуска (рис. 2.14, в). При этом в начальном интервале амплитуда тока увеличилась уже до 900 А, что привело к расплавлению большого куска проволоки и последующему длительному обрыву дуги. А это потребовало повторения циклов установления процесса ($N_{обр} = 3$).

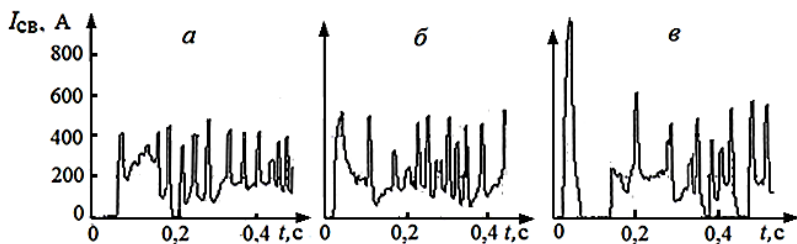


Рис. 2.14. Установление процесса с горячим пуском длительностью: а — 0 с, б — 0,01 с, в — 0,03 с (ВДУ-306МТ + ПДГО-512, Св-08Г2С Ø1,2 мм, 200 А, 24В)

Эксперименты на других режимах дали похожий результат. Поэтому в качестве оптимального значения можно принять $t_{гп} = 0,01\text{--}0,02$ с (для проволоки диаметром 1,6 мм и больше — 0,03 с).

Примеры обеспечения горячего пуска различаются по используемой элементной базе и алгоритмам управления источниками.

1) Начало сварки при высоком напряжении и переход к настроенному сварочному напряжению по сигналу датчика тока. Тиристорный выпрямитель ВДУ-506 [24] (разработка ВНИИЭСО начала 80-х г.) благодаря полнофазному начальному включению тиристоров имеет $U_x = 85$ В, поэтому начальный ток короткого замыкания на проволоках диаметром 1,2–1,6 мм достигает 600–800 А. Но уже после появления тока выше 7–10 А в аналоговой системе управления начинает работать обратная связь по напряжению, в результате чего полнофазное включение тиристоров прекращается, и напряжение выпрямителя уменьшается до настроенного значения ($U_{сву} = 18\text{--}50$ В). Такой же принцип начального ограничения действия обратной связи по напряжению (ООСН) используется во многих тиристорных выпрямителях российских и украинских заводов.

2) Начало сварки при высоком напряжении (на 5–6 В выше настроенного сварочного) и прекращение горячего пуска по команде таймера. Тиристорный выпрямитель ВДУ-506МТ [15] формирует горячий пуск в соответствии с описанной выше жесткой программой (см. рис. 2.14), причем время горячего пуска настраивается в интервале 0,01–0,03 с. Микропроцессорная система управления, в отличие от аналоговой, позволяет точнее задать и четче выдержать параметры горячего пуска.

3) Повышение тока короткого замыкания вспомогательным источником. Тиристорный выпрямитель ВД-506ДК имеет в своем составе низковольтную подпитку в виде диодного выпрямительного блока с $U_x = 15$ В и $I_k = 300$ А. При начальном коротком замыкании напряжение подпитки оказывается выше, чем у основного тиристорного источника, поэтому она вступает в работу, формируя мощный импульс тока. При таком конструктивном исполнении горячий пуск имеет высокое быстродействие.

4) Временное выключение дросселя в сварочной цепи. Экспериментальная установка для автоматической сварки под флюсом [22] в результате шунтирования дросселя на 0,08–0,1 с снижает индуктивность сварочной цепи до 0,2 мкГн. Поэтому с использованием проволоки Ø3 мм при установлении процесса развивается ток короткого замыкания до 1400 А при начальной скорости нарастания

150 кА/с. При такой высокой динамичности процесса дуга возникает с первого касания, а возможно и без него — в результате развития низковольтного импульсного разряда.

5) Высоковольтная пульсация напряжения. Инверторный источник в составе шлангового полуавтомата *PU 300K (Merkle, Германия)* формирует серию отдельных пиковых импульсов только в интервале установления процесса.

2.4.2. Управление источником и дросселем на этапе дугового разряда

Для успешного развития дугового разряда после короткого замыкания может использоваться как автоматическое управление с жесткой программой изменения во времени тока и напряжения, так и автоматическое регулирование с обратными связями и с адекватной реакцией источника или (и) дросселя на текущие отклонения этих параметров.

Алгоритмы жесткого программного управления возможны в двух вариантах в зависимости от начальной длины межэлектродного промежутка, образовавшегося в результате короткого замыкания (рис. 2.4).

1) При чрезмерно большой начальной длине ($l_{\text{дmax}} \approx l_{\text{в}}$) (рис. 2.4, а) сравнительно низкий сварочный ток $I_{\text{свmin}}$ обеспечит необходимую низкую скорость плавления $V_{\text{плmin}}$, а поэтому может привести к укорочению дуги до установившегося значения $l_{\text{ду}}$. Но при низком быстродействии описанного саморегулирования дуга может и оборваться, исчерпав запас эластичности. Проблема решается программным кратковременным (на 0,2–0,5 с) увеличением напряжения источника $U_{\text{х}}$. А чтобы это не привело к увеличению тока и скорости плавления, на это же время следует увеличить сопротивление сварочной цепи $Z_{\text{вн}}$, например включением дросселя или балластного реостата —

$$l_{\text{дmax}} \rightarrow I_{\text{свmin}} \rightarrow V_{\text{плmin}} \Rightarrow l_{\text{д}} \downarrow \Rightarrow l_{\text{ду}}$$

$$\uparrow \uparrow$$

$$U_{\text{х}} \uparrow Z_{\text{вн}} \uparrow$$

2) В случае же малой начальной длины ($l_{\text{дmin}} \approx 0$) (рис. 2.4, б) высокий сварочный ток $I_{\text{свmax}}$ обеспечит большую скорость плавления $V_{\text{плmax}}$, что должно бы привести к удлинению дуги до того же значения $l_{\text{ду}}$. Но и в этом случае из-за низкого быстродействия саморегулирования дуговой разряд может прерваться утыканием электрода в изделие. Здесь программное управление может ограничиться только кратковременным увеличением напряжения источника $U_{\text{х}}$, а поэтому и сварочного тока —

$$l_{\text{дmin}} \rightarrow I_{\text{свmax}} \rightarrow V_{\text{плmax}} \Rightarrow l_{\text{д}} \uparrow \Rightarrow l_{\text{ду}}$$

$$\uparrow \uparrow$$

$$U_{\text{х}} \uparrow$$

Выбор жесткого алгоритма программного управления из двух описанных зависит в конкретном случае от преобладающего результата

этапов короткого замыкания — с большой или малой длиной образующегося при этом межэлектродного промежутка.

Система автоматического регулирования с воздействием на напряжение источника АРНД_U сложнее, но и эффективнее выше описанных систем программного управления. Система АРНД_U имеет датчик фактического сварочного напряжения $U_{св}$ и устройство для его сравнения с заданным напряжением $U_{зн}$ (подробней в разд. 7.1.2). Например, при чрезмерно малой начальной длине дуги $l_{дmin}$ положительный знак сравнения величины $U_{зн} = U_{сву}$ с величиной $U_{св} = U_{свmin}$ вызовет увеличение напряжения холостого хода источника U_x . Поэтому увеличатся ток $I_{св}$ и скорость плавления электрода $V_{пл}$, а это приведет к увеличению длины дуги до заданного значения $l_{ду}$.

$$l_{дmin} \rightarrow U_{свmin} \rightarrow (U_{сву} - U_{свmin}) > 0 \Rightarrow U_x \uparrow \Rightarrow I_{св} \uparrow \Rightarrow V_{пл} \uparrow \Rightarrow l_d \uparrow \Rightarrow l_{ду}$$

Пример программного управления установлением процесса с двухстадийным жестким циклом при сварке в углекислом газе проволокой диаметром 1,2–2 мм приведен в монографии [8] (рис. 2.15).

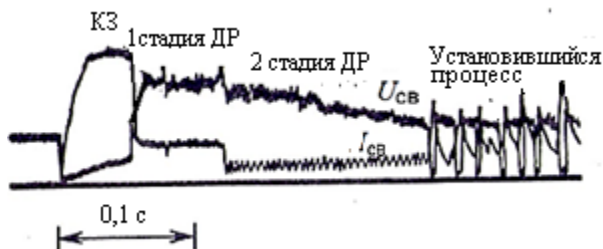


Рис. 2.15. Установление процесса с программным управлением напряжением и током дуги (проволока \varnothing 1,6 мм, CO_2) [8]

При большой начальной длине межэлектродного промежутка сначала необходимо удержать дугу от обрыва. Поэтому на первой стадии дугоразряда (ДР) длительностью 0,05–0,15 с устанавливают довольно высокое напряжение дуги $U_{д1} = 34–67$ В. Не желателен при этом чрезмерный ток, чтобы не вызвать быстрого плавления проволоки, здесь он составляет $I_{св1} = 60–190$ А. Затем необходимо замедлить плавление проволоки, чтобы сократить длину дуги до оптимальной. Для этого на второй стадии длительностью 0,1–0,4 с напряжение постепенно снижают до $U_{д2} = 20–40$ В, поэтому ток уменьшается до $I_{св2} = 35–130$ А. На рис. 2.15 видно, что процесс установился уже после первого касания проволокой изделия и по завершении запрограммированного цикла $t_{д1} + t_{д2}$ длительностью 0,23 с пришел в устойчивое состояние с частыми технологически короткими замыканиями каплями на ванну.

2.4.3. Программное управление подачей проволоки

Управление скоростью и направлением подачи электродной проволоки — прием, обеспечивающий быстрое установление процесса с помощью подающего механизма. Для этих целей обычно используется коллекторный двигатель с тиристорным или транзисторным регулятором (см. разд. 6.5).

Динамика механизма подачи электродной проволоки зависит как от электрических характеристик цепи питания, так и от механических параметров двигателя и приводимых им устройств. Как уже отмечалось, малая начальная скорость подачи полезна почти во всех вариантах и на всех этапах установления процесса, кроме случая перегорания вылета проволоки вблизи от токоподвода. Рассмотрим несколько примеров управления скоростью подачи в начале сварки (рис. 2.16).

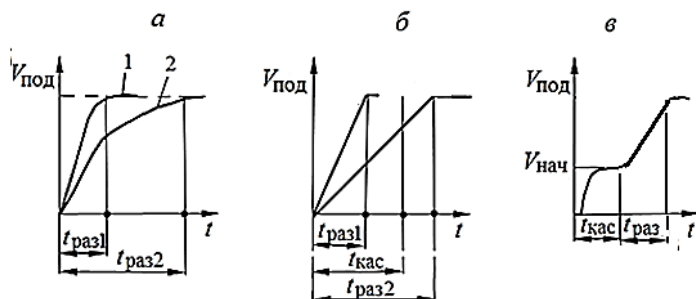


Рис. 2.16. Программное управление подачей проволоки:
а — с времязадающими RLC-цепями, б — с МП-регулятором,
в — с двухступенчатым разгоном

1) Простейший привод с коллекторным двигателем (рис. 2.16, а) обеспечивает постепенный разгон до величины скорости подачи $V_{\text{под}}$, зависящей от напряжения $U_{\text{я}}$ на якоре двигателя —

$$V_{\text{под}} \sim U_{\text{я}} (1 - e^{-\frac{t}{T_{\text{эм}}}})$$

Здесь электромеханическая постоянная времени подающего механизма $T_{\text{эм}} \sim J_{\text{пм}} R_{\text{я}}$. Поэтому время разгона $t_{\text{раз}} = 3T_{\text{эм}}$ определяется моментом инерции подающего механизма $J_{\text{пм}}$, зависящим от массы и размеров вращающихся частей двигателя, редуктора, а также кассеты с проволокой. Минимальное время разгона $t_{\text{раз1}}$ в реальных условиях сварки составляет около 0,1 с (линия 1). Для того чтобы увеличить время разгона до значения $t_{\text{раз2}}$, можно увеличить сопротивление в цепи якоря $R_{\text{я}}$, но обычно с этой целью последовательно с якорем устанавливают дроссель или параллельно якорю подключают конденсатор (линия 2).

2) Современный подающий механизм с тиристорным или транзисторным блоком питания и МП-регулятором может обеспечить более равномерное линейное нарастание скорости подачи (рис.2.16, б). Обычно время разгона сварщик подбирает в интервале $t_{\text{раз}} = 0,1\text{--}2$ с. При такой настройке сварку рационально начинать после предварительного закорачивания проволоки на изделие. В этом случае после пуска источника и привода короткое замыкание начинается при нулевой и заканчивается при относительно малой скорости подачи, а поэтому при небольшом вылете проволоки. Если время разгона настроено оптимально, то начальная длина дуги будет небольшой, и установление процесса произойдет с первого касания. Но если выполнять сварку без предварительного закорачивания, то полезный эффект от управляемого разгона снижается. В этом случае некоторое время до касания $t_{\text{кас}}$ тратится на движение электрода к изделию без тока, и замыкание происходит при слишком высокой скорости с сильным ударом по изделию.

3) Перспективный привод с транзисторным регулятором и МП-управлением может обеспечить нарастание скорости в две ступени (рис. 2.16, в). Первая ступень начинается при одновременном включении источника и механизма подачи на малой скорости $V_{\text{нач}}$. Поэтому электрод касается изделия при малом вылете и без резкого удара, а перегорание проволоки происходит именно в контакте «электрод–изделие». С начала касания срабатывает датчик сварочного тока, который переводит привод на вторую ступень — резкого ускорения подачи, что способствует быстрому установлению дугового разряда. Двухступенчатое программное управление не предъявляет жестких требований к сварщику в отношении манипуляций горелкой и одинаково эффективно действует как в случае предварительного закорачивания электрода, так и без него.

Выбор параметров двухступенчатого программного управления подачей заключается в настройке начальной скорости $V_{\text{нач}}$ на первой ступени и времени быстрого разгона $t_{\text{раз}}$ на второй ступени. Рис. 2.17 иллюстрирует результаты эксперимента по выбору этих параметров.

При малой начальной скорости $V_{\text{нач}} = 1,7$ м/мин (рис. 2.17, а) проволока касается изделия мягко, поэтому первый пик тока короткого замыкания не превышает 270 А. Проволока перегорает вблизи от изделия и при коротком вылете, поэтому даже при сравнительно медленном последующем разгоне дуговой процесс устанавливается с первого касания. На рис. 2.17, б показан другой пример также успешной, хотя и не оптимальной настройки разгона. Здесь явно чрезмерна начальная скорость — 4,2 м/мин, поэтому начальный пик тока короткого замыкания увеличился до 550 А, а это привело к расплавлению проволоки на большом участке. Но чрезвычайно быстрым разгоном подачи — 0,1 с — и

эта ошибка настройки была компенсирована — установление процесса произошло с первого касания. Наконец, на рис. 2.17, *в* показан результат неверной настройки разгона. Проблема усугубилась еще и тем, что сварка начиналась без предварительного закорачивания проволоки. Поэтому большая начальная скорость подачи привела к сильному удару проволокой по изделию и вызвала чрезмерный пик тока короткого замыкания 650 А, а сравнительно медленный разгон не позволил удерживать слишком длинную дугу ($N_{обр} = 2$, $t_{уст} = 0,45$ с).

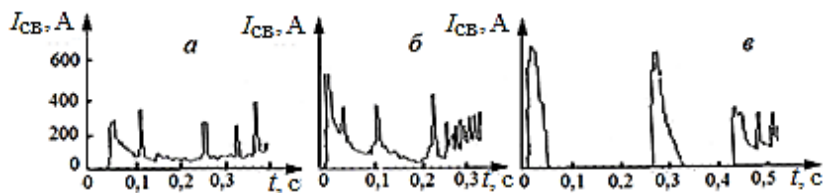


Рис. 2.17. Установление процесса с двухступенчатым разгоном:

а — $V_{нач} = 1,7$ м/мин, $t_{раз} = 0,5$ с, *б* — $V_{нач} = 4,2$ м/мин, $t_{раз} = 0,1$ с,
в — $V_{нач} = 4,2$ м/мин, $t_{раз} = 0,3$ с (выпрямитель ВДУ-306МТ с подающим механизмом ПДГО-512, проволока Св-08Г2С Ø1,2 мм, $V_{под} = 5,2$ м/мин, 200 А, 24 В)

Массовый эксперимент (табл. 2.4) для мотивированного выбора оптимальных значений $V_{нач}$ и $t_{раз}$ был выполнен на выпрямителе ВДУ-306МТ с горячим пуском и подпиткой, который даже без программного разгона обладает высокой надежностью установления процесса ($N_{обр} = 0,6-2,2$). Поэтому в порядке ужесточения требований даже в сравнении с ГОСТ 25616-83 желаемым результатом решено считать установление процесса с первого касания ($N_{обр} \approx 0$).

Видно, что при начальной скорости $V_{нач} = 1,7$ м/мин (100 м/час) такой результат достигается почти на всех режимах в широком диапазоне значений $t_{раз}$. При варьировании времени разгона оптимальным признано значение $t_{раз} = 0,3$ с. В подобном эксперименте на более простом диодном выпрямителе ВС-420 с витковым регулированием, но с таким же высокотехнологичным подающим механизмом Урал-3 с МПУ-управлением и двухступенчатым разгоном были получены такие же значения оптимальных величин $V_{нач} = 1,7$ м/мин и $t_{раз} = 0,3$ с.

Примеры программного управления скоростью и направлением подачи здесь рассмотрены в основном на серийном сварочном оборудовании.

1) Подающий механизм ПДГО-510 предоставляет сварщику возможность настройки времени разгона от 0,1 до 2 с (в других модификациях полуавтоматов 0,5–4 с). Инструкцией по эксплуатации рекомендована настройка прижима роликов, допускающая их проскальзывание при утыкании проволоки в изделие. Рекомендовано также начинать сварку с предварительно закороченной прово-

локой. При этих условиях надежность установления процесса существенно повышается. Так, при использовании тиристорного выпрямителя ВДУ-506М без подпитки, но с этим подающим механизмом $N_{обр} = 2,0-3,2$. А при использовании более совершенного выпрямителя ВДУ-506МТ с горячим пуском и высоковольтной подпиткой $N_{обр} = 0,8-2,0$ (см.табл. 2.1).

Таблица 2.4.

Выбор параметров двухступенчатого разгона (тиристорный выпрямитель ВДУ-306МТ + подающий механизм ПДГО-512)

Диаметр электрода, мм	0,8						1,2			1,6			
Скорость подачи про-волоки, м/мин	5,2			7,5			5,2			3,9		5,9	
Сварочный ток, А	70			100			200			250		350	
Сварочное напряжение, В	18			19			24			25		35	
Число обрывов $N_{обр}$													
Начальная скорость подачи, м/мин	0,8	1,7	3,3	0,8	1,7	4,2	0,8	1,7	0,8	1,7	1,7	4,2	
Длитель-ность разгона подачи, с	0,1	≥2	≥2	≥2	≥2	≥2	≥2	0,5	0	0,5	0	1	0,7
	0,3	≥2	0	0	0	0	≥2	0	0	0	0	0	0
	0,5	≥2	0	≥2	0	0	≥2	0,3	0	0	≥2	0	0,7
	1	≥2	0	≥2	≥2	0	≥2	1	0	≥2	≥2	0	0

Примечание: жирным шрифтом выделены неудовлетворительные результаты

2) Подающий механизм ПДГО-512 имеет вышеописанную двухступенчатую программу разгона, «зашитую» в памяти МП-регулятора и не доступную сварщику ($V_{нач} = 1,7$ м/мин и $t_{раз} = 0,3$ с). При сварке проволоками диаметром 0,8–1,6 мм на токах 100–400 А комплект ВДУ-306МТ+ ПДГО-512 обеспечивает высокую надежность установления процесса ($N_{обр} = 0,2-2,5$, $t_{уст} = 0,1-0,3$ с) (см. табл. 2.1).

3) Самоходный аппарат для сварки под флюсом А-1416 при установлении процесса реверсирует подачу проволоки. С этой целью используется реле сварочного напряжения. Сварка начинается при предварительно закороченном на изделие электроде, и поэтому выключенном реле. Но замкнутый в исходном состоянии контакт реле запускает привод на подъем электрода, т.е. задает его движение от изделия, в результате чего и зажигается дуга. Когда напряжение дуги достигнет предварительно настроенного значения (28-44 В), реле сработает и другим контактом реверсирует двигатель на подачу проволоки в сторону изделия. Надежность зажигания дуги за счет реверсирования привода очень высока ($N_{обр} \approx 0$) (см. рис. 2.7).

4) Трактор АДФ-1202 для сварки под флюсом входит в систему АРНД_у автоматического регулирования напряжения дуги с воздействием на скорость подачи. Основное назначение системы состоит в поддержании непрерывного

горения дуги в установившемся процессе. Но она так же эффективно действует и при установлении процесса — удлиняет дугу для получения настроенного сварочного напряжения при отводе электрода от изделия или укорачивает дугу после реверса в случае ее чрезмерного удлинения. В комплекте с выпрямителем ВДУ-1202 она обеспечивает безупречное установление процесса во всем диапазоне токов от 300 до 1250 А.

5) Полуавтомат в составе конвенционального диодного выпрямителя с витковой настройкой ВС-300Б и опытного импульсного механизма подачи проволоки [229]. На осциллограмме рис. 2.18 видно, что установление процесса происходит с первого касания. В интервале импульса подачи наблюдается мощное короткое замыкание с перегоранием контакта электрода с изделием, а в интервале остановки подачи — появление и установление дугового разряда. Все последующие короткие замыкания не имеют отношения к начальному установлению процесса, а являются импульсами управляемого переноса с принудительными технологическими короткими замыканиями каплями на ванну.

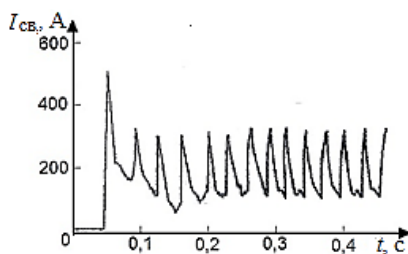


Рис. 2.18. Установление процесса при импульсной подаче проволоки (Св-08Г2С, Ø1,2 мм, частота 33 Гц, шаг 2,4 мм, 190 А)

3. НАЧАЛЬНОЕ ЗАЖИГАНИЕ ДУГИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫМ РАЗРЯДОМ

3.1. Феноменология зажигания высоковольтным разрядом

Физический механизм зажигания поясним с помощью рис. 3.1. Для стимулирования начального зажигания дуги параллельно основному источнику подключен вспомогательный источник малой мощности, но высокого напряжения. По соображениям безопасности он выполняется импульсным или высокочастотным. Назначение этого источника — пробить искрой, т.е. ионизировать, межэлектродный промежуток, по которому затем пойдет сварочный ток.

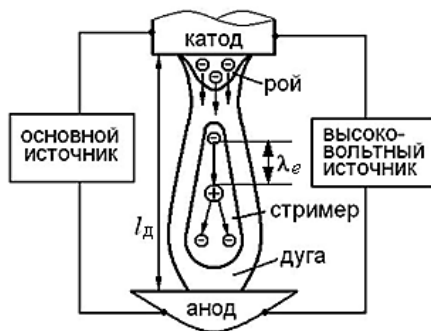


Рис. 3.1. Схема зажигания дуги высоковольтным разрядом

Механизм высоковольтного пробоя газового промежутка при атмосферном давлении объясняют с опорой на стримерную теорию [28]. При любых физических условиях в газе имеется хотя бы небольшое количество свободных электронов. Высоковольтный источник создает между электродом и изделием электрическое поле с напряжением в несколько тысяч вольт. Свободный электрон разгоняется полем и при столкновении с нейтральной частицей газа ионизирует ее. Образовавшиеся при этом новые носители тока — вторичные электроны — в свою очередь, разгоняются и при столкновении с другими нейтральными частицами также ионизируют их. Такой процесс имеет лавинообразный характер.

Другие свободные электроны, а также электроны, образованные фотоионизацией от возбужденных атомов, вызывают новые лавины, часть из которых вливается в первую. В результате образуется стример — плазменный канал с высокой концентрацией заряженных частиц.

Лавина электронов в составе стримера достигает анода. Головная часть стримера, состоящая из ионов, сравнительно медленно продвигается по направлению к катоду, из которого в результате вырывается рой электронов. Рой многократно усиливает ионизацию в стримере и увеличивает его проводимость. Произошел пробой газового промежутка, между электродом и изделием образуется ионизированный плазменный мостик, который внешне проявляется как белая извивающаяся искра.

В условиях сварки по токопроводящему каналу стримера начинает протекать ток основного источника. Сначала дуговой разряд поддерживается автоэлектронной эмиссией с катода, возможно также ионно-электронной эмиссией. Затем под действием тока основного и вспомогательного источников происходит разогрев электродов и развитие термоэлектронной эмиссии. Если ток основного источника стал достаточным для существования самостоятельного дугового разряда, вспомогательный источник отключают.

Итак, зажигание высоковольтным разрядом протекает в два этапа. На первом происходит пробой межэлектродного промежутка высоким напряжением вспомогательного источника $U_{\text{вн}} = 1\text{--}12$ кВ. На втором — развивается дуговой процесс энергией основного источника с напряжением $U_{\text{х}}$ более 40 В.

На рис. 3.2, а приведена осциллограмма тока высоковольтного источника при зажигании дуги между покрытым электродом и изделием на первом этапе. Импульс тока высоковольтного источника имеет форму затухающей синусоиды с частотой $f_{\text{н}} = 125$ кГц, его амплитуда $I_{\text{max}} = 50$ А, продолжительность $t_{\text{н}} = 50$ мкс (при снижении тока до значения 2,5 А, т.е. 5 % от максимального). На рис. 3.2, б приведены осциллограммы тока и напряжения при аргонодуговой сварке на постоянном токе на втором этапе — в процессе развития дугового разряда после мягкого пуска (предполагается, что процессы развития дуги после бесконтактного высоковольтного пробоя и после контактного мягкого пуска подобны). Сначала возникает дуга с сосредоточенным катодным пятном на вольфрамовом электроде с относительно высоким напряжением $U_{\text{д}} = 18\text{--}23$ В. Затем при достижении торцом электрода достаточно высокой температуры устанавливается дуга с распределенным катодным пятном и пониженным напряжением $U_{\text{д}} = 6\text{--}15$ В.

Приемы повышения надежности зажигания дуги высоковольтным разрядом рассмотрим по отдельности для двух этапов.

На первом этапе зажигания необходимо обеспечить пробой газового промежутка, для чего:

- повышают напряжение высоковольтного источника $U_{\text{вн}}$;
- уменьшают расстояние между электродом и изделием, соответствующее будущей длине дуги $l_{\text{д}}$;

- используют межэлектродную среду, например, защитный газ, с низким напряжением пробоя;
- учитывают, что вероятность пробоя не зависит ни от диаметра, ни от материала электрода, хотя возрастает при его заострении.

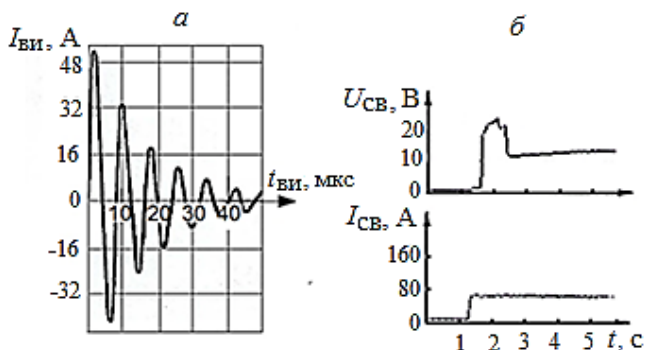


Рис. 3.2. Зажигание высоковольтным разрядом: а — генерирование высокочастотного импульса ($U_{ви} = 2500$ В [29]), б — установление дугового разряда (выпрямитель ВДУ-506МТ, электрод ЭВЛ Ø2 мм, 65 А, 13 В, аргон)

На втором этапе зажигания необходимо обеспечить развитие самостоятельного дугового разряда с питанием от основного источника. На этом этапе обнаружено много общего с явлениями, наблюдающимися при зажигании коротким замыканием с отводом электрода. Поскольку высоковольтный пробой используется в основном при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом, ранее названные (разд. 1.1) приемы повышения надежности зажигания уточним применительно к вольфрамовому электроду:

- увеличивают напряжение холостого хода источника (меньше, чем при сварке покрытым электродом);

- снижают длину дуги (самые тонкие изделия сваривают при длине дуги 0,5–2 мм; при большой толщине заготовок, чтобы поддержать рациональное соотношение между шириной шва и глубиной проплавления, длину увеличивают; при автоматической сварке на постоянном токе с этой же целью регулятором поддерживают предусмотренное в ГОСТ 60974-1-2012 рациональное соотношение между током и напряжением $U_{св} = 10 + 0,04 I_{св}$);

- увеличивают ток и уменьшают диаметр электрода (на постоянном токе прямой полярности допустимое по условию нагрева лантанированного вольфрама значение тока может быть вычислено по соотношению $I_{св} = 65 d_э^{3/2}$);

— используют активирующий флюс (основное назначение флюса — улучшать очистку и проплавление сварного шва, а наличие в нем легкоионизируемых компонентов поддерживает горение дуги).

Особенности зажигания дуги переменного тока при сварке алюминия неплавящимся электродом связаны с низкой эмиссионной способностью алюминиевого изделия — катода в полупериоде обратной полярности. А в начале сварки зажигание затруднено еще и в связи с недостаточным разогревом вольфрамового электрода — катода в полупериоде прямой полярности. Кроме того, необходимо синхронизировать момент подачи высоковольтного импульса с фазой переменного сварочного тока. Относительно фазы напряжения холостого хода источника этот импульс должен отставать на $75-80^\circ$. При аргонодуговой сварке алюминиевых сплавов зажигание высоковольтным разрядом почти не имеет альтернативы. Действительно, мягкий пуск при неустойчивой дуге переменного тока бесполезен, а зажигание при нормальном коротком замыкании приводит к повреждению вольфрамового электрода и ухудшению качества начального участка шва.

Рис. 3.3, а иллюстрирует зажигание дуги при совместном действии трансформатора и возбудителя с амплитудой импульса 6 кВ (на осциллограмме пики напряжения снижены фильтром, защищающим осциллограф). Первый же импульс возбудителя, совпавший с переходом напряжения трансформатора через нуль в полупериоде обратной полярности, привел к зажиганию дуги. Так же действует возбудитель и в следующие полупериоды, обеспечивая надежные повторные зажигания и тем самым установление и длительное поддержание устойчивого дугового процесса.

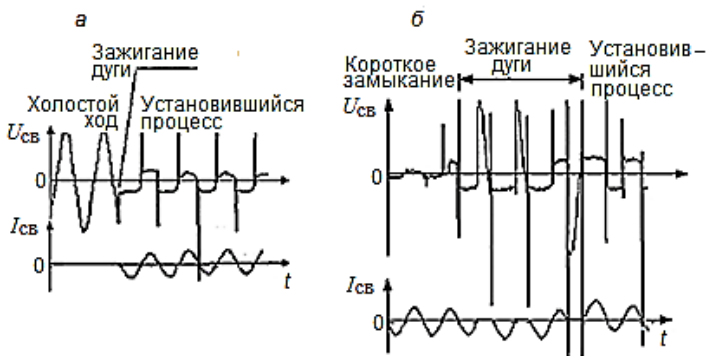


Рис. 3.3. Зажигание дуги переменного тока возбудителем ВСД-02 (а) и импульсным стабилизатором УСГД (б) при аргонодуговой сварке (трансформатор ТДМ-402, сплав АМг6, электрод ЭВЛ Ø2 мм, 65 А, 17 В)

Несколько худший результат дает использование для начального зажигания импульсного стабилизатора, основное назначение которого заключается в стимулировании только повторных зажиганий дуги переменного тока при уже установившемся дуговом процессе (см. разд. 5.6). На рис. 3.3, б показаны типичные осциллограммы напряжения и тока при совместной работе трансформатора и стабилизатора с амплитудой напряжения 200–500 В. Здесь после короткого замыкания дуга сначала загорается и несколько периодов продолжает гореть только в полупериодах обратной полярности, где проявляется автоэлектронная эмиссия с алюминиевого изделия. И только после разогрева вольфрамового электрода термоэлектронная эмиссия с него улучшает условия повторного зажигания и в полупериодах прямой полярности. Такой технологический процесс с начальным коротким замыканием допустим при сварке только неответственных алюминиевых конструкций.

Особенности зажигания дуги переменного тока при сварке покрытым электродом с использованием импульсного стабилизатора. При ручной сварке для стимулирования дуги переменного тока в установившемся процессе обычно используют импульсную стабилизацию. Стабилизатор с частотой следования импульсов 50 Гц предназначен для повторного зажигания дуги в начале более проблемного полупериода обратной полярности, а с частотой 100 Гц — в обоих полупериодах. К сожалению, параметры таких импульсов (амплитудное напряжение 200–500 В и длительность около 0,1 мс), как правило, недостаточны для бесконтактного начального зажигания. Но совместное использование обоих механизмов зажигания — короткого замыкания и импульсного воздействия — дает положительный эффект. На рис. 3.4 сравниваются два варианта зажигания.

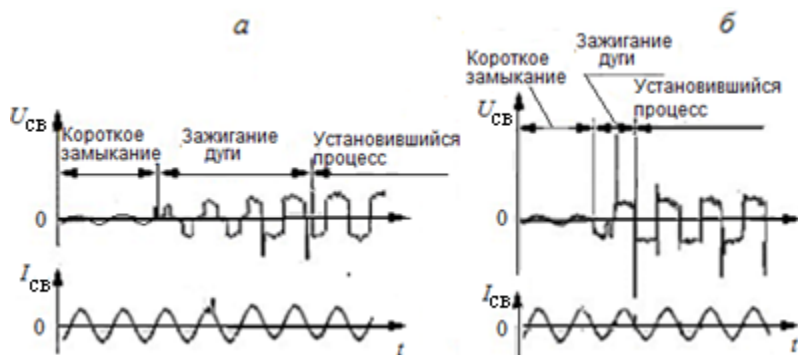


Рис. 3.4. Зажигание коротким замыканием без импульсной стабилизации (а) и с ней (б)

На рис. 3.4, а видно, что без импульсной стабилизации дуга зажигается неуверенно. После разрыва цепи короткого замыкания в течение

пяти полупериодов дуга возникает каждый раз только в довольно поздней фазе синусоиды — приблизительно через 70° относительно фазы тока, после чего возвращается к короткому замыканию. И только после достаточного нагрева электрода и межэлектродного промежутка в течение трех следующих полупериодов с большими пиками напряжения повторного зажигания дуговой процесс, наконец, устанавливается. А при использовании импульсного стабилизатора (рис. 3.4, б) дуга возникает всего за один период и далее остается устойчивой.

3.2. Непосредственные критерии зажигания высоковольтным разрядом

3.2.1. Аргонодуговая сварка неплавящимся электродом

Поскольку зажигание высоковольтным разрядом обеспечивается последовательным действием высоковольтного и основного источников, то испытание надежности зажигания выполняется с отдельным определением критериев для двух этапов.

Пробивное расстояние $l_{\text{проб}}$ — непосредственный критерий для оценки зажигания на первом этапе. Это максимальное расстояние от электрода до изделия, которое еще пробивает высоковольтный источник. В табл. 3.1 сведены данные из паспортных характеристик источников по величине $l_{\text{проб}}$. В паспортах, как правило, не указываются условия определения пробивного расстояния, отсюда некоторая несогласованность приведенных данных. Большинство современных высоковольтных источников рассчитывается на показанное $l_{\text{проб}} = 2$ мм. Такое расстояние гарантирует зажигание без случайных касаний электродом изделия и не требует чрезмерного завышения напряжения и мощности разряда, опасных для изоляции основного источника. Экспериментальное определение $l_{\text{проб}}$ можно выполнять в штативе с неподвижной в каждой попытке горелкой, постепенно увеличивая от одной попытки к следующей расстояние между электродом и изделием.

Напряжение пробоя $U_{\text{проб}}$ межэлектродного промежутка протяженностью, соответствующей заданной длине l_d будущей дуги — также непосредственный критерий надежности зажигания на первом этапе. На рис. 3.5 приведены экспериментальные данные по определению напряжения пробоя между стальным электродом диаметром 4 мм с полусферическим торцом и стальным образцом с плоской поверхностью [30]. Пробой выполнялся разрядом конденсатора через повышающий трансформатор. Видно, что напряжение пробоя растет с увеличением расстояния между электродами l_d . В аргоне $U_{\text{проб}}$ в несколько раз меньше, чем в воздухе и других многоатомных газах (N_2 , CO_2). Например, для про-

боя в аргоне зазора в 5 мм достаточно напряжения с амплитудным значением 3,2 кВ, а в воздухе — 8 кВ. Установлено также, что $U_{\text{проб}}$ не зависит от расхода защитного газа в диапазоне 5–15 л/мин и, что особенно важно, не зависит от материала электродов (проверено на Fe, Cu, W, покрытых электродах).

Таблица 3.1.

Характеристики вспомогательных источников для зажигания дуги высоковольтным разрядом

Марка источника		ОСПЗ-2М	ОСППЗ-300	ОП-240 Огниво	БП-80	БП-315	БП-500	ВВД-02 RE165D
Амплитуда напряжения, кВ		6	5	3	8	4	4	6
Частота, кГц		500	100–250					
Длительность, мкс		200	150–500		15 (на уровне 0,7 амплитуды напряжения)			200–400
Пробивное расстояние <i>l</i> _{проб} , мм	воздух	2	2,5	>1	2			>2
	аргон	5	9			2	2	10

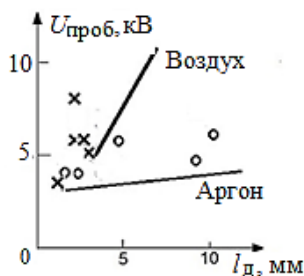


Рис. 3.5. Зависимость напряжения пробоя от длины газового промежутка [30] (отдельными точками отражены паспортных параметры высоковольтных источников из табл. 3.1)

Электрический пробой газовых промежутков подробно изучен энергетиками с целью предотвращения повреждения высоковольтного оборудования и линий электропередач [7, 24, 28, 31]. Рассмотрим некоторые закономерности, установленные в этих исследованиях, для решения обратной задачи – расчета необходимого значения напряжения пробоя межэлектродного промежутка:

$$U_{\text{проб}} = k_{\text{имп}} k_{\text{неод}} \epsilon_{\text{проб}} l_{\text{д}} [\text{кВ}], \quad (3.1)$$

где $\epsilon_{\text{проб}}$ — напряженность поля пробоя (электрическая прочность газа) при нормальных условиях (100 кПа, 293 К, влажность 0) в однородном электрическом поле между плоскими электродами ($\epsilon_{\text{проб}}$ прямо зависит от потенциала ионизации газа, обратно — от длины свободного пробега электрона в этом газе; для аргона $\epsilon_{\text{проб}} = 0,7$ кВ/мм, а для воздуха — 3,5 кВ/мм);

$k_{\text{имп}}$ — коэффициент, учитывающий импульсный характер высоковольтного напряжения (для сварочных условий можно использовать упрощенное соотношение $k_{\text{имп}} = (t_{\text{и}} + 2)/t_{\text{и}}$, если $t_{\text{и}}$ принять в мкс);

$k_{\text{неод}}$ — коэффициент, учитывающий местную концентрацию напряженности неоднородного поля (при стержневом электроде и плоской поверхности изделия $k_{\text{неод}} = 0,3\text{--}0,7$; из этих значений особенно низкие — при положительном потенциале на электроде).

Для надежного зажигания имеет значение длительность приложения высоковольтного импульса. Средняя длительность пробоя $t_{\text{проб}}$ складывается из статистического времени запаздывания $t_{\text{зап}}$, т.е. среднего времени до появления первого свободного электрона в межэлектродном промежутке, и времени формирования пробоя $t_{\text{фор}}$, т.е. длительности развития стримера до искры:

$$t_{\text{проб}} = t_{\text{зап}} + t_{\text{фор}} [\text{мкс}]. \quad (3.2)$$

Естественно, длительность импульса $t_{\text{и}}$ вспомогательного источника на уровне $U_{\text{проб}}$ должна быть больше длительности пробоя $t_{\text{проб}}$. Типичные значения длительности $t_{\text{проб}}$, обеспечивающие развитие высоковольтного разряда при напряжении, превышающем $U_{\text{проб}}$, составляют 1–20 мкс.

Для сварочных условий более точный расчет $U_{\text{проб}}$ можно выполнить по эмпирическим соотношениям, приведенным в табл. 3.2 [220]. Приближение к условиям сварки здесь достигнуто применением стержневого заточенного на конус электрода при короткой дуге (от 0,5 мм), а также использованием пикообразного импульса прямой полярности.

На втором этапе — развития дугового разряда — для способа аргонодуговой сварки большинство критериев надежности зажигания, разработанных для покрытых электродов, годятся после коррекции и для неплавящегося электрода. Это — предельная начальная длина дуги, в меньшей степени — вероятность и количество попыток зажигания.

Предельная начальная длина $l_{\text{днmax}}$ — это длина, при которой дуга еще возникает после пробоя и не угасает затем в течение 1 с после выключения высоковольтного источника и быстрого отвода электрода.

Условия эксперимента корректируются следующим образом:

Таблица 3.2

Характеристики пробоя газового промежутка в условиях сварки

Газ	Технологически обоснованные межэлектродные расстояния $l_{дз}$, мм	Напряжение пробоя $U_{проб}$, кВ	Энергия заряда накопительного конденсатора $A_{зар}$, Дж
аргон	0,5–8	$2,4 + 0,15 l_{д}$	0,01–0,15
гелий	0,5–8	$3,25 + 0,39 l_{д}$	0,10–0,25
азот	0,5–5,5 > 5,5	$2,94 + 0,92 l_{д}$ $0,52 + 1,36 l_{д}$	0,15–0,40
двуокись углерода	0,5–4 > 4	$3,2 + 1,2 l_{д}$ $2,4 + 1,4 l_{д}$	0,30–0,50
воздух	0,5–4,5 > 4,5	$3,05 + 1,1 l_{д}$ $1,84 + 1,37 l_{д}$	0,30–0,50

— образцы основного металла: для источника постоянного тока — из высоколегированной стали, переменного тока — из алюминиевого сплава, с толщиной δ в мм, зависящей от силы тока по соотношению $I_{д} = (50–75) \delta$;

— электроды по ГОСТ 23949-80 вольфрамовые лантанированные марки ЭВЛ, заточенные на конус с углом 15–60°;

— режимы сварки: род тока и полярность дуги — в зависимости от назначения сварочной установки, пространственное положение — нижнее, ток — от минимального до номинального тока установки из следующего ряда: 25, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 400 и 500 А, диаметр электрода $d_э$ — в мм из соотношения $I_{д} = (30–60) d_э$ (верхние значения — для сварки на постоянном токе), расход аргона $Q_г$ в л/мин — по соотношению $Q_г = (2–2,5) d_э$ или $Q_г = 3 + 0,02 I_{д}$.

Предельная начальная длина может определяться в таком же штативе, как и при использовании покрытых электродов (рис. 3.6). При подготовке эксперимента образец 10 закрепляется на основании 11, к которому с помощью сварочного провода подключается один из зажимов источника. Горелка 8 для аргонодуговой сварки, соединенная с другим зажимом источника, крепится в траверсе 5. Траверса может перемещаться по стойке 3 между верхней 4 и нижней 7 обоймами. Горелка устанавливается над образцом с точным фиксированием начальной длины дуги $l_{дн}$. Для начала эксперимента траверсу вместе с горелкой опускают, сжимая пружину 6, до упора соплом горелки в изолированный ограничитель 9, так чтобы расстояние от электрода до образца состав-

ляло $l_{\text{проб}} = 2$ мм. В этом положении горелки выполняют пуск, нажимая кнопку на рукоятке горелки — включаются подача газа, а затем основной и одновременно вспомогательный источники.

После высоковольтного пробоя и появления дуги траверсу отпускают, что приводит к разжатию пружины и быстрому удлинению дуги до настроенного начального значения $l_{\text{дн}}$. Если дуга надежно зажглась и не угасла в течение 1 с, то опыт повторяют на другом месте и с заново подготовленным электродом, в каждой новой попытке увеличивая начальную длину. Предельной начальной длиной $l_{\text{днmax}}$ считается такая, при которой дуга еще зажигается в трех идентичных попытках. В случае зажигания дуги с мягким пуском ограничитель убирается, и эксперимент начинают с опускания горелки до касания электродом образца.

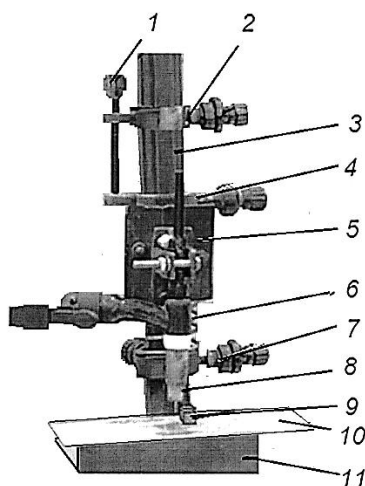


Рис. 3.6. Штатив с горелкой для аргонодуговой сварки

Разрывная длина дуги $l_{\text{др}}$ определяется в том же штативе, но при постепенном подъеме верхней обоймы 2 за счет вращения маховичка 1 с винтом, а поэтому при подъеме горелки с горящей дугой до ее обрыва. Разрывная длина, как уже отмечалось, не является полноценным критерием надежности зажигания, и приводится здесь только для возможного сравнения с результатами опытов других исследователей.

Пример оценки зажигания на втором этапе — развития дугового разряда — выполнялся при имитации аргонодуговой сварки на постоянном токе без включения высоковольтного источника. Вместо него для питания дуги на режимах мягкого пуска использовалась только подпитка выпрямителя ВДУ-506М с тремя ступенями настройки балластного реостата (табл. 3.3). Дуга зажигалась в штативе коротким замыканием с быстрым отводом электрода действием пружины.

жины — для нахождения предельной начальной длины или с медленным отводом (около 5 мм/с) — для определения разрывной длины. Как видно, предельная начальная длина $l_{\text{днmax}}$ на всех испытанных режимах не ниже 15 мм, что в несколько раз превышает рекомендуемую при сварке длину $l_d = 2\text{--}5$ мм. Достаточно высока и эластичность дуги, характеризуемая разрывной длиной не менее 17 мм. Оба эти факта убеждают в высокой надежности зажигания и допустимости свободного манипулирования горелкой. Очевидно, главная причина надежного установления дугового процесса на втором этапе заключается в высоком напряжении холостого хода $U_x = 95$ В источника постоянного тока.

Таблица 3.3.

Непосредственные критерии оценки на втором этапе зажигания дуги при аргонодуговой сварке (выпрямитель ВДУ-506М, электрод ЭВЛ, прямая полярность)

Подпитка		Критерий оценки	Диаметр электрода, мм					
U_x , В	I_k , А		1	1,6	2	3	4	6
95	10	Предельная начальная длина дуги $l_{\text{днmax}}$, мм	>25	>25	20	>25	>25	15
	30		30	>35	>35	>35	>35	30
	47		>35	>35	>35	>35	>35	>35
95	10	Разрывная длина дуги $l_{\text{др}}$, мм	28	31	24	29	26	17
	30		42	44	45	44	39	35
	47		47	>50	>50	>50	>50	45

Пример оценки надежности зажигания дуги переменного тока с высоковольтным разрядом. Аргонодуговая сварка алюминия имитировалась в штативе при использовании трансформатора ТДМ-402 с возбудителем-стабилизатором ВСД-02 на трех режимах — при токе 65, 170 и 240 А. На осциллограмме (см. рис. 3.3, а) видно, что дуга зажглась с первого импульса возбудителя в первой попытке. После этого пошел установившийся процесс с регулярным чередованием полупериодов дугового разряда и стабилизирующих импульсов. Как видно, возбудитель обеспечил мгновенный переход от этапа высоковольтного пробоя к этапу устойчивого дугового процесса. Такой же результат по количеству попыток до первой успешной получен и на других режимах ($N_{\text{поп}} = 1$). Поэтому и значения других непосредственных критериев достаточно высоки — предельная начальная длина $l_{\text{днmax}} = 10\text{--}12$ мм, разрывная длина $l_{\text{др}} = 22\text{--}30$ мм.

3.2.2. Ручная сварка покрытым электродом

При комбинировании зажигания коротким замыканием с действием импульсного стабилизатора в качестве непосредственных критериев могут использоваться характеристики, ранее предложенные для оценки зажигания одним только коротким замыканием (см. разд. 1.2). Это — вероятность зажигания P_z , количество касаний $N_{\text{кас}}$ и длительность установления дугового процесса $t_{\text{уст}}$, а также предельная начальная длина дуги $l_{\text{днmax}}$.

Пример оценки надежности комбинированного зажигания при ручной сварке покрытыми электродами показан в табл. 3.4. Испытывался трансформатор ТДМ-402 с разными импульсными стабилизаторами на двух самых проблемных режимах: 1 — при минимальном токе первого диапазона 70 А, 2 — при минимальном токе второго диапазона 190 А и одновременно очень низком напряжении холостого хода 56 В. Для сравнения оценивались также свойства трансформатора без стабилизатора. Основным критерием надежности зажигания принято количество касаний $N_{\text{кас}}$. Видно, что без импульсной стабилизации надежность зажигания при использовании электродов УОНИ 13/55 низкая ($N_{\text{кас}} > 4$). Любой стабилизатор улучшает этот критерий до высокого или приемлемого уровня ($N_{\text{кас}} = 1\text{--}2,5$). Видно также, что количество касаний как критерий надежности зажигания хорошо коррелируется с другими непосредственными критериями. Действительно, при введении импульсных стабилизаторов одновременно с уменьшением количества касаний снижается время установления процесса и увеличиваются предельная начальная и разрывная длины дуги.

Таблица 3.4.

Непосредственные критерии зажигания при коротком замыкании с импульсной стабилизацией (трансформатор ТДМ-402, электрод УОНИ 13/55)

Электрод, режим	3 мм, 70 А, 23 В ($U_x=75$ В)				4 мм, 190 А, 25 В ($U_x=56$ В)		
	Без ИС	SGD-4	СДИ	УСГД	Без ИС	СДИ	УСГД
Количество касаний $N_{\text{кас}}$	>4	2,5	2,0	1,8	>4	1	1
Длительность установления процесса $t_{\text{уст}}$, с	>10	—	0,86	1,9	7,0	0,63	0,27
Предельная начальная длина дуги $l_{\text{днmax}}$, мм	<3	<3	3	3	4	7	5
Разрывная длина дуги $l_{\text{др}}$, мм	3	11	13	12	7	12	10

Примечания:

SGD-4 — параметры импульсов при сварке 50–180 В.

СДИ — 50–170 В, 10–50 А, 0,2–0,3 мс.

УСГД — 70–200 В, 80–300 А, 0,15–0,3 мс.

3.3. Косвенные критерии зажигания высоковольтным разрядом

Амплитудное напряжение высоковольтного источника $U_{\text{ви}}$ — косвенный критерий надежности зажигания на первом этапе. Оно назнача-

ется по условию пробоя межэлектродного промежутка технологически обусловленной протяженности — длины будущей дуги l_d —

$$U_{ви} \geq U_{проб.}$$

При выборе величины $U_{ви}$ следует учитывать взаимосвязь $U_{проб.}$ и $t_{проб.}$. Чем больше напряжение вспомогательного источника, тем меньше $t_{проб.}$. Зависимость $U_{проб.} = f(t_{и})$ называется вольт-секундной характеристикой (ВСХ) пробоя (рис. 3.7). Необходимо обеспечивать настройку параметров вспомогательного источника $U_{ви}$ и $t_{и}$ выше ВСХ пробоя, показанной жирной линией. Но при этом следует учитывать ВСХ изоляции, чтобы предотвратить пробой вне межэлектродного промежутка и не допустить повреждения изоляции сварочных проводов, технологического оборудования и основного источника. По ГОСТ 60974-4-2013 амплитудное значение $U_{ви}$ ограничивается 15 кВ при ручной сварке и 20 кВ — при автоматической.

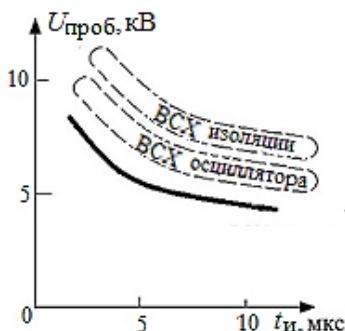


Рис. 3.7. Вольт-секундная характеристика пробоя воздушного промежутка длиной 2 мм [31]

Паспортные значения $U_{ви}$ нескольких осцилляторов и возбуждителей при гарантируемой l_d (табл. 3.1) нанесены точками на рис. 3.5. Как видно, все они существенно превышают величину напряжения пробоя $U_{проб.}$, показанную сплошными линиями. Это объясняется не только необходимостью обеспечения запаса, но и учетом импульсного характера $U_{ви}$. Ток разряда имеет форму обратной (спадающей) экспоненты или затухающей синусоиды (см. рис. 3.2, а). Поэтому, например, для возбуждителя УПД-1 [32] с амплитудным значением $U_{ви} = 8$ кВ гарантируется еще и поддержание напряжения выше 0,7 от амплитудного, т.е. 5,6 кВ, в течение 15 мкс. По вольт-секундной характеристике (рис. 3.7) можно убедиться, что такие параметры возбуждителя гарантируют пробой заявленного в паспорте расстояния $l_{проб} = 2$ мм.

На основе анализа паспортных характеристик известных осцилляторов и возбуждителей для сварки в воздушной среде с начальной длиной

дути $l_d = 2$ мм можно признать достаточным амплитудное значение $U_{ви} = 5-7$ кВ. Для аргонодуговой сварки неплавящимся электродом при такой же начальной длине дуги 2 мм достаточно напряжения $U_{ви}$ с амплитудной величиной 3–4 кВ. Но если импульс высоковольтного разряда особенно короткий, то его амплитудное значение приходится существенно увеличить. Например, в большинстве случаев аргонодуговой сварки алюминия вольфрамовым электродом на переменном токе в работе [33] при длительности полупериода напряжения осциллятора около 2 мкс рекомендуется напряжение высоковольтного источника $U_{ви}$ с амплитудным значением 8–10 кВ.

Родственные дуговой сварке процессы плазменной сварки, наплавки и напыления, использующие плазмотроны с большой внутрисопловой длиной дуги и высокими скоростями истечения многоатомных газов (водород, углеводороды, воздух) требуют еще более высокого напряжения — 6–12 кВ.

Энергия заряда $A_{зар}$ накопительного конденсатора в составе высоковольтного источника — косвенный критерий надежности зажигания.

$$A_{зар} = C_{зар} U_{зар}^2 / 2.$$

Эта энергия должна превышать энергию, затрачиваемую на пробой межэлектродного промежутка —

$$A_{зар} \geq A_{проб} = \int_0^{t_{проб}} U_{ви} I_{ви} dt$$

При последовательном включении возбудителя в сварочную цепь основного источника почти вся энергия накопительного конденсатора передается в межэлектродный промежуток ($A_{зар} \approx A_{проб}$), поэтому косвенный критерий $A_{зар}$ может считаться полноценной характеристикой возбудителя (см. табл. 3.2). Например, для пробоя воздушного промежутка протяженностью до 4,5 мм необходима энергия $A_{зар} = 0,3-0,5$ Дж. В случае же параллельного включения возбудителя приходится учитывать значительные потери энергии и неполную разрядку накопительного конденсатора ($\eta A_{зар} = A_{проб}$, где КПД возбудителя $\eta < 1$).

Математическое описание электрических процессов на втором этапе позволит выявить факторы зависимости зажигания от параметров основного источника. Для этого в балансе напряжений дугового разряда (1.2) зададимся скачкообразным изменением (возникновением) напряжения холостого хода U_x основного источника:

$$U_{ка} + \varepsilon_{ст} l_d = U_x - R_{и} I_d - L \frac{dI_d}{dt} \quad (3.3)$$

Решая это уравнение, при нулевом начальном токе получаем уравнение переходного процесса по сварочному току:

$$I_d(t) = \frac{U_x - U_{ка} - \varepsilon_{ст} I_d}{R_{и}} (1 - e^{-\frac{R_{и}}{L} t}). \quad (3.4)$$

Выполним анализ уравнения (3.4) с целью выявления косвенных критериев для оценки надежности зажигания на этапе установления дугового разряда. Очевидно, что для успешного зажигания ток I_d должен быстро вырасти выше минимально возможного тока $I_{свmin}$ (тока устойчивого горения дуги) для данного электрода (подробней см. разд. 4.3). Из уравнения следует, что ток I_d прямо зависит от напряжения холостого хода, обратно — от сопротивления источника и менее значительно — от индуктивности.

Напряжение холостого хода основного источника U_x или подпитки U_{x1} — косвенный критерий для оценки надежности зажигания на втором этапе — развития дугового разряда. На этом этапе физические процессы сходны с наблюдаемыми при зажигании коротким замыканием, поэтому и рекомендуемые значения U_x близки к величинам, приведенным в разд. 1.3. Это напряжение в соответствии с ГОСТ 60974-1-2012 составляет у источников для ручной сварки 40–113 В, а для автоматической сварки — до 141 В. Для источников переменного тока эти же рекомендации относятся тоже к амплитудным значениям U_{xm} , тогда как действующие значения U_x , например, при ручной аргонодуговой сварке не должны превышать 80 В. Для ручной плазменной сварки, наплавки и напыления назначаются более высокие значения — 80–180 В с принятием дополнительных мер электробезопасности.

Внутреннее сопротивление источника $R_{и}$ (или $Z_{и}$) — второстепенный косвенный критерий надежности зажигания, используемый только для характеристики маломощных конвенциональных источников для аргонодуговой сварки. Успешное развитие процесса зажигания гарантируется в таких источниках неизменно высоким на всех режимах напряжением U_x , поскольку сварочный ток здесь обычно настраивается изменением сопротивления, а не напряжения источника. При сварке малоамперной дугой без ущерба для зажигания ток от 1 до 25 А может настраиваться балластным реостатом при изменении сопротивления $R_{и}$ от 100 до 2 Ом.

Пример оценки надежности зажигания малоамперной дуги при аргонодуговой сварке на постоянном токе был выполнен на выпрямителе ВДУ-506МТ при выключенном тиристорном блоке. Дуга снабжалась энергией только от подпитки с напряжением холостого хода $U_{x1} = 95$ В через балластный реостат на три ступени (рис. 3.8). Поскольку высоковольтный разряд здесь не использовался, то при осциллографировании фиксировались только процессы на втором этапе — развития дуги. Испытание на всех режимах прошло успешно — на каждом режиме по три–пять зажиганий с первой попытки. Однако на осциллограммах отмечено различие в длительности установления дугового процесса. При $R_{и} = 5$ Ом, где $I_{св}$ составил 18 А (рис. 3.8, а), переход от режима с сосредото-

точным катодным пятном, характерным повышенным напряжением 30 В, к распределенному пятну с напряжением 13 В затягивается до 1,5 с. При уменьшении сопротивления источника электрод нагревается быстрее, поэтому переход к распределенному пятну существенно ускоряется (рис. 3.8, б и в).

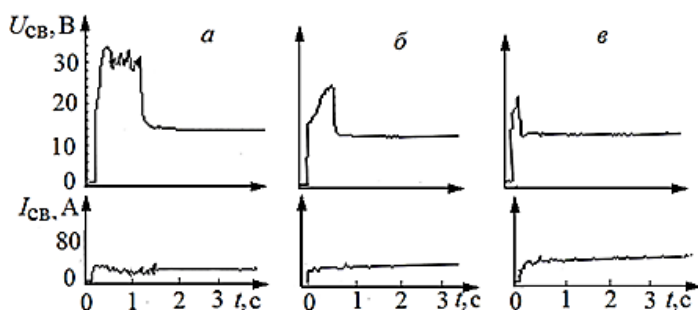


Рис. 3.8. Установление малоамперного дугового процесса при аргодуговой сварке в зависимости от сопротивления балластного реостата подпитки: а — 5, б — 3, в — 2,5 Ом (выпрямитель ВДУ-506МТ, электрод ЭВЛ Ø2 мм)

3.4. Конструкции и характеристики высоковольтных источников

Вспомогательный источник с основным обычно соединяется параллельно, но отделяется от последнего электрическим фильтром. Мало мощный основной источник может включаться со вспомогательным последовательно, при этом упрощается конструкция фильтра.

При совместной работе основного источника переменного тока со вспомогательным необходимо согласовать их фазы. Проблема решается двумя способами. В простейшем варианте высоковольтный источник последовательно выдает множество импульсов (до 15 за полупериод сетевого напряжения) в расчете на то, что который-нибудь из них окажется благоприятным для начального зажигания дуги — это источник непрерывного действия. Технически более сложным, но и более эффективным вариантом является запуск высоковольтного источника вскоре после перехода тока основного через нуль. Этот момент обнаруживается сменой полярности у датчика сварочного напряжения или тока. В этом случае бывает достаточно подачи по одному импульсу в каждом из нескольких последовательных полупериодов — это источник импульсного действия. Источники непрерывного действия, как правило, с высокочастотным характером разряда, появились раньше и назывались осцилляторами, а более поздние источники импульсного действия — возбудителями. Но это деление нестрогое.

Рассмотрим работу нескольких типовых осцилляторов и возбуждителей с анализом тех электрических характеристик, которые оказывают существенное влияние на надежность зажигания.

Осциллятор *ОСПЗ-2М*, показанный на рис. 3.9, представляет собой искровой высокочастотный генератор непрерывного действия параллельного включения. Напряжение сети U_1 повышающим трансформатором $T1$ увеличивается почти до 1 кВ. От вторичного напряжения U_2 идет заряд конденсатора $C5$. К моменту достижения достаточно высокого напряжения разрядник FV пробивается искрой, его сопротивление резко снижается. Благодаря этому образуется колебательный контур $C5-L3-FV$, в котором в результате обмена энергией между конденсатором $C5$ и катушкой $L3$ возникает высокочастотный затухающий ток с напряжением U_3 и частотой $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_3C_5}}$.

С помощью катушки $L4$, входящей в состав разделительного трансформатора $T2$, высокочастотное напряжение увеличивается до значения U_4 . Это напряжение подается на сварочный межэлектродный промежуток и пробивает его. Вслед за этим вступает в действие основной источник G , при этом осциллятор отключают.

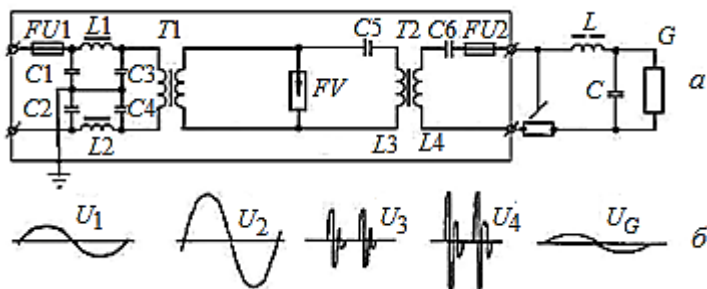


Рис. 3.9. Принципиальная схема осциллятора *ОСПЗ-2М* (а) и карта его напряжений (б)

Осциллятор создает помехи радиоприему и электронным системам управления производственного оборудования, поэтому непрерывная работа осциллятора допускается в течение не более 1 с. Повторное его включение разрешается только раз в 10 с. Чтобы помехи не проникали в питающую сеть, на входе осциллятора установлен фильтр $C1-C4, L1-L2$. Для защиты основного источника G от высокого напряжения осциллятора собирают фильтр нижних частот $L-C$. Рекомендуются значения индуктивности порядка $L = 0,2$ мГн и емкости $C = 0,25$ мкФ. Дроссель L обладает большим реактивным сопротивлением для тока высокой частоты $X_L = 2\pi fL$, что снижает потери энергии осциллятора внутри основного источника. Конденсатор C имеет малое реактивное

сопротивление при высоких частотах $X_C = 1/(2\pi fC)$, поэтому в цепи основного источника потери напряжения осциллятора невелики. Необходимо обеспечить также защиту цепей осциллятора от мощного тока основного источника. С этой целью в виде фильтра установлен защитный конденсатор $C6$.

Достоинством осциллятора является высокая эффективность бесконтактного зажигания дуги. Его недостатки — низкая надежность разрядника и опасность поражения сварщика высоким напряжением. Разрядник нуждается в частой зачистке его вольфрамовых электродов и настройке расстояния между ними. Поражение сварщика высоким напряжением низкой частоты возможно при попадании напряжения со вторичной обмотки трансформатора $T1$ непосредственно на электрододержатель. От этого защищают конденсатор $C6$ и предохранитель $FU2$. Также обязательно заземление корпуса осциллятора и установка предохранителя $FU1$.

На рис. 3.10 упрощенно изображена осциллограмма высоковольтного напряжения U_4 в сопоставлении по времени с осциллограммой напряжения U_2 (900 В, 50 Гц). Фаза начала генерирования импульсов зависит от расстояния между электродами разрядника и составляет $40\text{--}60^\circ$. Напряжение разряда U_4 на выходе осциллятора имеет форму затухающей синусоиды с амплитудой 6 кВ и частотой 500 кГц. Длительность импульса около 0,2 мс, энергия — 0,08 Дж.

Следующие импульсы возникают после затухания предыдущего импульса, поскольку при этом размыкается цепь разрядника. Всего в течение полупериода питающего напряжения длительностью 10 мс генерируется от 10 до 14 импульсов с интервалами около 0,5 мс. Указанные характеристики получены при холостом ходе осциллятора. При подключении нагрузки и фильтра значения некоторых параметров изменятся, в частности полезная энергия импульса снизится до 0,05 Дж.

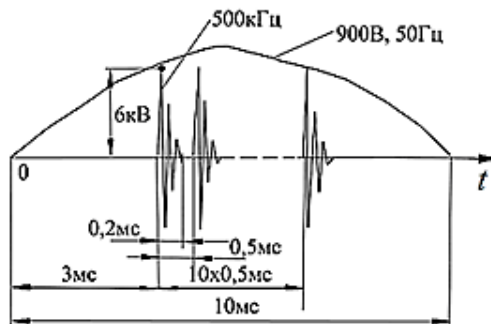


Рис. 3.10. Схематичные осциллограммы высоковольтных импульсов в осциляторе ОСПЗ-2М

Методика расчета осциллятора изложена в работе [7]. Другие конструкции осцилляторов описаны в работах [7, 24, 33, 34]. Среди них как прогрессивную тенденцию следует выделить осциллятор последовательного включения. В этом случае не нужен дроссель в составе фильтра, но ограничивается ток основного источника.

Блок поджига дуги БП-315 показан упрощенной схемой (рис. 3.11). Он представляет собой импульсный возбудитель и питается переменным током. В его состав входят накопительный конденсатор $C2$, высоковольтный трансформатор T , а также тиристорный коммутатор $VS1$, $VS2$ с системой управления. В одном из полупериодов питающего напряжения откроется тиристор $VS1$, в результате мощный импульс тока пройдет по цепи $L-T-C2-VS1$. По мере заряда конденсатора $C2$ ток убывает, а после окончания заряда тиристор закрывается.

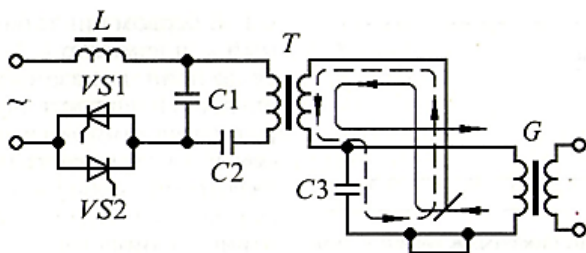


Рис. 3.11. Блок поджига дуги БП-315

Трансформированный вторичной обмоткой T импульс напряжения с амплитудой 4 кВ по цепи, показанной штриховой линией, подается на межэлектродный промежуток, вызывая зажигание дуги. В следующем полупериоде питающего напряжения при необходимости открывается тиристор $VS2$, что вызовет перезарядку конденсатора $C2$ и новый более мощный поджигающий импульс. Если дуга при этом не зажглась, генерирование импульсов продолжится с частотой следования 100 Гц. Дроссель L ограничивает ток в зарядном контуре, а конденсатор $C1$ защищает тиристоры от перенапряжений.

Ток основного источника G замыкается через вторичную обмотку T по пути, показанному тонкой линией. Конденсатор $C3$ защищает основной источник от высокого напряжения импульса. Таким образом, блок является комплектом устройством, поскольку не нуждается в дополнении фильтром. Главным преимуществом импульсных возбудителей в сравнении с осцилляторами непрерывного действия является отсутствие опасного высокого напряжения низкой частоты. Описанный блок поджига к тому же не имеет разрядника, что повышает его надеж-

ность, упрощает настройку и снижает уровень радиопомех. Методика расчета импульсных возбудителей изложена в работах [32, 34, 213].

Другие конструкции возбудителей: однотактные, двухтактные, параллельного и последовательного включения с основным источником, с питанием от цепи как переменного, так и постоянного тока приведены в работах [24, 33, 34, 35, 212].

Встроенный импульсный возбудитель-стабилизатор (рис. 3.12) входит в состав специализированного источника для аргодуговой сварки. Начальное зажигание, а также стимулирование уже горящей дуги переменного тока обеспечиваются с помощью общего блока поджига. После включения сварочного трансформатора с внешними разьемами X1, X2 напряжение подается также на трансформатор T3, который заряжает конденсатор C3 через диод VD. С начала полупериода обратной полярности сварочного напряжения отпирается тиристор VS, что приводит к разряду C3 по двум путям.

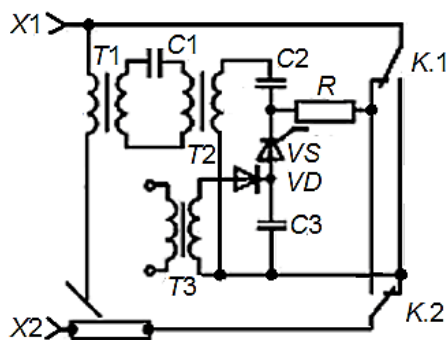


Рис. 3.12. Блок поджига установки УДГУ-302

Во-первых, через конденсатор C2 проходит ток по первичной обмотке трансформатора T2, который создает импульс напряжения во вторичной обмотке около 3 кВ. Этот импульс в свою очередь вызывает импульсный разряд в цепи T2–C1–T1, что приводит к формированию высоковольтного импульсного разряда (ВИ) поджига дуги по цепи: вторичная обмотка T1–межэлектродный промежуток.

Во-вторых, относительно низковольтный импульсный разряд (НИ) конденсатора C3 величиной до 500 В прикладывается к дуге непосредственно по цепи C3–VS–R–K.1–дуга–K.2, что способствует уже развитию дугового разряда. При горячей дуге разряд конденсатора C3 на дугу с начала каждого полупериода обратной полярности способствует ее повторному зажиганию. При сварке на постоянном токе дугой прямой полярности блок поджига меняет свою полярность в результате

переключения контактов $K.1$ и $K.2$ и работает только при начальном зажигании.

Согласование фаз тока высоковольтного $i_{\text{вн}}$ и низковольтного $i_{\text{ни}}$ импульсов с фазой тока сварочного трансформатора $i_{\text{тр}}$ и получение суммарного тока $i_{\text{св}}$, показанного штриховой линией, иллюстрирует рис. 3.13. Это должно обеспечить начальное зажигание и поддержание преддугового тока повторного зажигания I_3 не ниже 5 А, пока дугу не подхватит основной трансформатор [36].

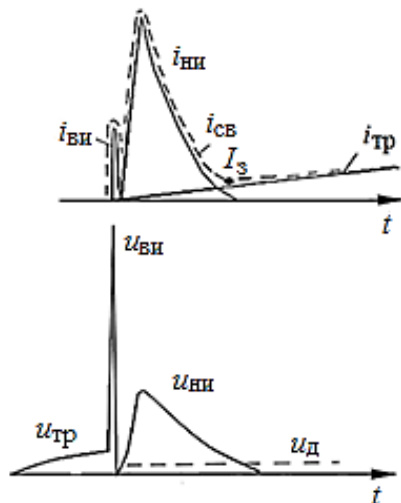


Рис. 3.13. Схематичные осциллограммы тока и напряжения встроенного возбудителя-стабилизатора (установка УДГУ-302)

Возбудитель-стабилизатор последовательного включения разработан в виде приставки, устанавливаемой в цепь вторичной обмотки сварочного трансформатора $ТМ$ (рис. 3.14, а) [37]. В состав возбудителя-стабилизатора входят пороговый элемент $A1$ на основе делителя напряжения $R1-R2$, ключ $A2$ в виде силового биполярного транзистора VT и генератор высокочастотных импульсов $A3$ с повышающим трансформатором TV на выходе.

Сразу после перехода вторичного напряжения $ТМ$ через нуль пороговый элемент $A1$ замыкает ключ $A2$, поэтому трансформатор $ТМ$ приходит в режим короткого замыкания с быстрым нарастанием тока. И хотя ток в дуге при этом отсутствует (рис. 3.14, б), источник подготавливается к ускоренному зажиганию дуги. Затем пороговый элемент размыкает ключ, и трансформатор $ТМ$ переключается на дугу, ток в которой возникает и резко увеличивается. На этапе начального зажигания

одновременно на межэлектродный промежуток от высокочастотного генератора $A3$ подается импульс напряжения с амплитудой в несколько киловольт (показано штриховой линией). Если дуга зажглась, то далее приставка выполняет функцию импульсного стабилизатора, стимулируя повторные зажигания в каждом полупериоде импульсами в десятки вольт (сплошные линии на осциллограммах). Приставка испытана при ручной сварке покрытыми электродами, в том числе с основным покрытием. Такой же принцип действия имеет трансформатор Русич со встроенным возбудителем-стабилизатором.

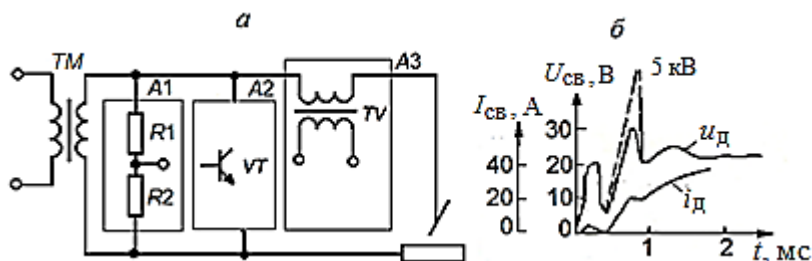


Рис. 3.14. Трансформатор с возбудителем-стабилизатором:
 а — функциональная схема, б — осциллограммы тока и напряжения в полупериоде обратной полярности (электрод ОЗС-4 Ø3 мм, 110 А, 23 В)

4. УСТОЙЧИВОСТЬ ПРОЦЕССА СВАРКИ НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ

4.1. Феноменология устойчивого дугового процесса на постоянном токе

4.1.1. Понятие устойчивости сварочного процесса

Содержание терминов «устойчивость» и «стабильность» нуждается в уточнении и согласовании. Далее предлагается разделить содержание термина «стабильность процесса сварки», используемого в ГОСТ 25616-83, между двумя другими терминами, которые приняты в смежных фундаментальных науках. «Устойчивость сварочного процесса» — это, в терминах теории автоматического управления, способность энергетической системы «источник–дуга» или «источник–подающий механизм–дуга» поддерживать дуговой разряд без обрывов и коротких замыканий. «Стабильность параметров режима» — это, в терминах теории измерений, характеристика отклонения текущих значений, например, сварочных тока или напряжения, от их средних значений. Такой же терминологический подход к анализу процесса механизированной сварки в защитном газе декларирует и автор работы [38]. Напротив, в ГОСТе грубо смешиваются эти понятия в методике испытания источников для ручной сварки. Действительно, для оценки «стабильности процесса сварки» этот стандарт предписывает выставять низкие баллы за «горение дуги с частыми обрывами» (это характеристика устойчивости системы «источник–дуга»), а высокие баллы — за «равномерно горящую дугу без вибраций» (а это характеристика стабильности параметров режима). Очевидно, что с позиций современных представлений о сварочных свойствах стандарт нуждается в уточнении терминов с разделением понятий устойчивости и стабильности.

Другим недостатком ГОСТ 25616-83 является субъективный характер методики испытания и балльной оценки источников для ручной сварки. Человеческий фактор проявляется в таком испытании на стадии наплавки контрольных валиков, определяемой квалификацией и старательностью сварщика–испытателя. Но человеческий фактор может проявиться и на стадии оценки результатов, которая зависит от психических особенностей и даже от предвзятости эксперта. Поэтому ниже приводятся методики и критерии, снижающие или устраняющие субъективный характер оценки устойчивости. При этом принимаются меры для упрощения методик, чтобы сделать их доступными как производителю, так и пользователю сварочного оборудования.

Устойчивость дугового разряда при питании от современных источников постоянного тока — выпрямителя, инверторного источника или вентильного генератора — как правило, довольно высока. В таком процессе дуга горит достаточно долго (в течение полного расходования электрода или всего времени выполнения шва) и непрерывно (без длительных обрывов и замыканий электродом на ванну). Кратковременные же обрывы, не требующие ответных манипуляций электрододержателем или корректирующих реакций со стороны системы управления для устранения таких обрывов, и прекращающиеся самопроизвольно, допустимы, если не вредят качеству шва. Это же касается и коротких замыканий электродными каплями на ванну, если они не затягиваются чрезмерно, например, с прилипанием электрода к ванне.

Поэтапный анализ устойчивости при различных типах и масштабах возмущений дугового процесса позволяет всесторонне оценить функциональную пригодность конкретного экземпляра сварочного оборудования. Как уже отмечалось во Введении для источников, сначала проверяется принципиальная (статическая) устойчивость, т.е. способность энергетической системы поддерживать непрерывное горение дуги при малых возмущающих воздействиях. Затем проверяют устойчивость при больших возмущениях по длине дуги и напряжению сети. При механизированной и автоматической сварке учитывают также возмущения по скорости подачи проволоки, вылету электрода, скорости сварки и т.д. Возмущения, вызываемые переносом электродного металла, особенно приводящие к коротким замыканиям капли на сварочную ванну, учитывают при механизированной сварке в активных газах, а также при ручной сварке электродами с основным и целлюлозным покрытием.

Вопрос о допустимости нарушений должен решаться отдельно для конкретного метода или применения сварки с учетом длительности и опасности таких нарушений. В технологическом эксперименте установлено [39], что при использовании электродов основного типа (с фтористо-кальциевым покрытием) нарушения газовой и шлаковой защиты продолжительностью более 0,3 с приводят к появлению в шве пор. И наоборот, в работе [40] при сварке такими же электродами, склонными к порообразованию азотом из воздуха, не обнаружено пор при нарушениях короче 0,15–0,2 с. Достаточно подробно и тщательно зависимость появления пор в шве от факта и количества прилипаний исследована в фундаментальной работе [41]. Установлено, что при сварке электродами с покрытием основного типа на пониженных режимах поры в шве возникают именно на участках, сваренных с многочисленными прилипаниями.

Поэтому далее для обеспечения высокого качества при ручной сварке нарушения длительностью более 0,3 с будем считать недопусти-

мыми. При автоматической сварке, характеризующейся большим объемом и плотной шлаковой защитой сварочной ванны, прием недопустимыми нарушения длительностью более 0,5 с.

Выявление нарушений устойчивости дугового процесса (длительных обрывов дуги и замыканий электродом на ванну) осуществляется следующими способами:

- визуально сварщиком или наблюдателем, контролирующим процесс сварки — по прекращению свечения дуги;

- с помощью стрелочных или цифровых приборов (обрывы — по исчезновению тока, короткие замыкания — по резкому снижению напряжения);

- с помощью запоминающего осциллографа по записи сварочного тока и напряжения при длительности нарушений более 0,3–0,5 с;

- с помощью электронного регистратора, настроенного на фиксирование этих нарушений такой же длительности;

- с помощью детектора светового излучения дуги по резкому снижению сигнала оптического датчика [42],

- с помощью акустического датчика по резкому изменению звука дуги [43].

На рис. 4.1 приведены примеры идентификации нарушений дугового процесса по осциллограммам тока и напряжения. Процесс ручной сварки покрытым электродом, иллюстрируемый рис. 4.1, *а*, не только устойчивый (ни одного обрыва или короткого замыкания), но и стабильный (незначительные отклонения тока и напряжения от средних значений).

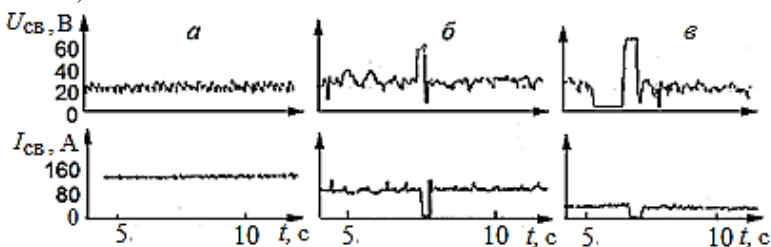


Рис. 4.1. Оценка устойчивости по осциллограммам при ручной сварке:
а — устойчивый процесс (УОНИ 13/55, Ø4 мм, 150 А); *б* — неустойчивый (УОНИ 13/55, Ø4 мм, 100 А); *в* — неустойчивый (МР-3, Ø2 мм, 45 А) (фильтр отсекает колебания с частотой выше 100 Гц)

На рис. 4.1, *б* показаны осциллограммы сварки таким же электродом, но в более трудных условиях — в вертикальном положении и на пониженном токе. Этот процесс не только нестабильный, но еще и неустойчивый. На осциллограмме обнаружен обрыв дуги длительностью

0,35 с, проявляющийся провалом на кривой тока до нуля и скачком напряжения до величины напряжения холостого хода источника. На такое нарушение сварщик отреагировал опусканием электрода, что привело к короткому замыканию и быстрому повторному зажиганию дуги. Но даже такой перерыв в горении дуги при сварке электродом с основным покрытием приводит к нарушению защиты сварочной ванны и насыщению шва атмосферными газами. Поэтому даже одного обрыва при расходе всего электрода может оказаться достаточным для неудовлетворительной оценки устойчивости.

На рис. 4.1, в приведен другой вариант нарушения дугового процесса — «прилипание», т.е. длительное касание электродом сварочной ванны — в течение 1,2 с. Для устранения этого нарушения сварщик поднял электрод, что привело к установлению режима холостого хода длительностью 0,6 с, после чего повторно зажег дугу. В этом случае вероятность появления дефекта еще более высока.

4.1.2. Приемы повышения устойчивости

Такие приемы чрезвычайно многочисленны, но специфичны для конкретных способов и методов сварки. Поэтому здесь без подробного анализа назовем только общие принципы их реализации.

Группы технологических приемов:

- увеличение мощности и погонной энергии сварочного процесса;
- назначение режима с учетом влияния на устойчивость диаметра электрода, рода тока и полярности дуги, пространственного положения шва, а также квалификации сварщика;
- ограничение уровня возмущений (по длине дуги, напряжению сети, скорости подачи и вылету электродной проволоки, скорости сварки, расходу и составу защитной среды и т.д.);
- введение легкоионизируемых и ограничение содержания деионизирующих компонентов в сварочных материалах.

Группы электротехнических приемов:

- увеличение напряжения холостого хода источника;
- сглаживание кривой тока и напряжения источника;
- выбор наклона внешней характеристики источника в зависимости от наклона вольт-амперной характеристики дуги;
- формирование комбинированной внешней характеристики источника, у которой каждый участок оптимально удовлетворяет обеспечение своей стадии сварочного процесса;
- назначение индуктивности дросселя в сварочной цепи для удовлетворения требований динамики переходных процессов;
- стабилизация параметров режима (тока, напряжения и др.) за счет обратных связей;

- использование высокочастотных импульсов для стимулирования дуги;
- использование подпитки для заполнения провалов тока и ускорения переходных процессов.

4.2. Непосредственные критерии устойчивости на постоянном токе

Набор и методика определения непосредственных критериев устойчивости специфичны для конкретного способа сварки, что и будет учтено ниже.

4.2.1. Ручная сварка покрытым электродом

Частота обрывов дуги $n_{обр}$, приходящихся на интервал полного расплавления одного электрода — непосредственный критерий устойчивости ручной сварки. Это самая распространенная характеристика хода сварочного процесса, естественным образом связанная с понятиями неустойчивого и устойчивого процесса наличием или отсутствием недопустимых нарушений дуги.

Мониторинг нарушений дугового процесса удобно вести с помощью осциллограмм сварочного тока и напряжения. Так, на рис. 4.2 приведены гистограммы количества обрывов и коротких замыканий, обнаруженных на осциллограммах процесса сварки за время полного расплавления одного электрода.

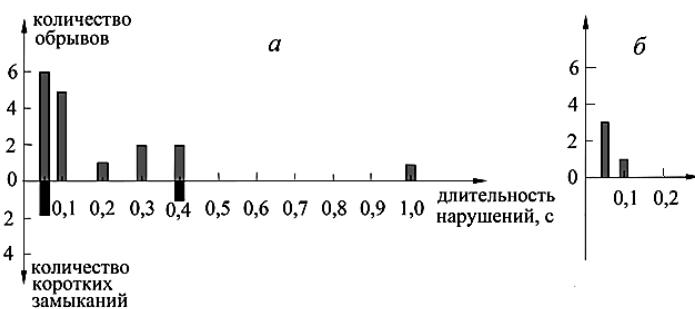


Рис. 4.2. Гистограммы нарушений процесса сварки на прямой (а) и обратной (б) полярности дуги (чоппер ЧПР-315 с выпрямителем ВД-306А, электрод Fox Cel Ø 3,2 мм, 65 А, 33 В)

Выполнялась сварка корневого шва трубопровода в потолочном положении электродами с целлюлозным покрытием. В этом эксперименте оценивалась зависимость устойчивости от полярности дуги. Вид-

но (рис. 4.2, *а*), что на прямой полярности процесс более динамичен. Но основная часть нарушений длится не более 0,3 с и устраняется самопроизвольно. Задача сварщика — своевременно реагировать на возникающее отклонение длины дуги, чтобы не допустить более длительных нарушений. За полное время сварки таких нарушений набралось 4. Причем самое большое из них, обрыв дуги длительностью 1 с, привел к появлению дефекта — местного неспривара корня шва. Безусловно, такой процесс нужно считать неустойчивым.

При сварке дугой обратной полярности (рис. 4.2, *б*) процесс менее динамичен. Длительность отдельных нарушений не превышает 0,1 с, причем прекращаются они без вмешательства со стороны сварщика и не успевают нанести ущерба качеству шва. Такой процесс, конечно, квалифицируется как устойчивый.

Итак, при ручной сварке нарушения длительностью более 0,3 с, а также все нарушения, потребовавшие ручного повторного зажигания, будем считать недопустимыми, и при числовой оценке устойчивости фиксировать как обрывы дуги. Прерывания дуги длительностью не более 0,3 с могут считаться условно допустимыми, особенно если они необходимы для управления мощностью или погонной энергией процесса (вертикальный шов, сварка модулированным током и т.д.).

Условия эксперимента с идентификацией и подсчетом нарушений при ручной сварке необходимо унифицировать для любых источников — это облегчит их сравнение и повысит качество обработки результатов. Значения тока, нормальные для конкретного электрода, предлагается принимать из табл. 4.1. Интервал испытываемых режимов должен по возможности широко охватывать диапазон настройки конкретного источника. Так, источник с диапазоном 70–400 А с учетом рекомендаций табл. 4.1 можно испытывать при токах 80, 100, 150, 220 и 300 А. Остальные условия унифицированы с принятыми в ГОСТ 25616-83 (образцы, электроды, режимы, сварщик) и ранее уже были указаны во Введении.

Методика определения частоты обрывов такова. После выполнения пробной попытки сварщик на одном режиме выполняет 3–5 зачетных наплавов с фиксированием количества обрывов, каждый раз на новом образце и новым электродом до полного его расплавления. Частота обрывов дуги $n_{обр}$ [раз/эл] получается делением общего количества обрывов на количество электродов.

У большинства современных источников при работе квалифицированного сварщика в благоприятных технологических условиях (нормальное для данного электрода значение тока, нижнее положение и т.д.) обрывы отсутствуют полностью (табл. 4.2). Но это не должно подрывать доверия к указанному критерию, поскольку получение абсолютно

го результата (ни одного обрыва) с технологической точки зрения дает больше информации о качестве процесса, чем благоприятный характер вибрации или звука дуги при субъективной оценке, принятой в ГОСТ 25616-83 [43]. Тем не менее, следует признать как недостаток этого критерия его слабую дифференцированность — он не позволяет сравнивать источники между собой при одинаково положительной оценке устойчивости, когда $n_{обр} = 0$. Кроме того, он не содержит информации о запасе устойчивости и не проявляет физической связи с параметрами источника для их корректировки. Решение проблемы — в дополнительной оценке устойчивости в менее благоприятных технологических условиях — при пониженном токе; в пространственных положениях, отличных от нижнего; при использовании проблемных в технологическом отношении электродов.

Таблица 4.1.

*Ток для испытания источников для ручной сварки
стальным покрытым электродом*

Диаметр электрода, мм		2	2,5	3	4	5	6
Ток, А	Нормальный $I_{св.норм}$ (нижнее положение)	60	80	100	150	220	300
	Пониженный (вертикальное положение)	50	70	85	130	–	–
	Минимальный (нижнее положение)	40	60	70	110	150	200

Испытание на пониженном токе предлагается выполнять при наплавке вертикального валика снизу вверх. При этом ток снижается в сравнении с нормальным на 15–20 % (табл. 4.1). Эксперимент на минимальном токе выполняется в нижнем положении. В качестве минимального тока рекомендуются значения, сниженные на 25–35 % относительно нормального (табл. 4.1), если они допустимы по технической характеристике соответствующей марки электрода.

В обоснование этих рекомендаций можно сравнить осциллограммы рис. 4.1, *а* и *б*, где резкое снижение тока со 150 до 100 А привело к потере устойчивости. Другой пример (рис. 4.3), наоборот, положительно характеризует источник, обеспечивший абсолютную устойчивость при сварке на нормальном, пониженном и минимальном токах. Во всех трех вариантах по критерию частоты обрывов зафиксирован одинаковый результат ($n_{обр} = 0$), хотя стабильность параметров режима при снижении тока заметно ухудшилась. Важным выводом в отношении испытываемого источника и принятого нормального тока 60 А является большой запас устойчивости по току — не менее 30 А (50 %).

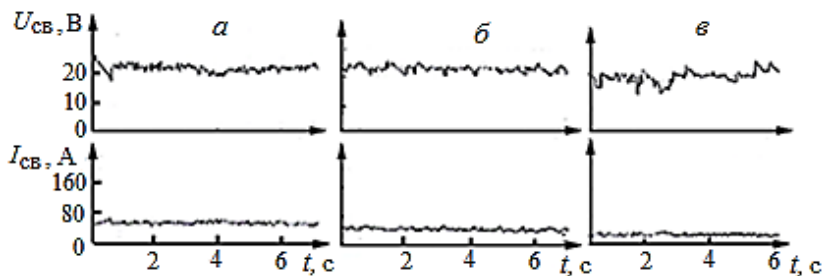


Рис. 4.3. Оценка устойчивости по осциллограммам при нормальном токе 60 А (а), пониженном для сварки вертикального шва 45 А (б) и минимальном 30 А (в) (агрегат АДД-2х2501, электрод МР-3 Ø2 мм)

Общая длительность опасных нарушений $T_{\text{нар}}$ (обрывов и коротких замыканий) при расплавлении одного электрода — дополнительный (по отношению к $n_{\text{обр}}$) критерий устойчивости. Он включает в себя не только недопустимые, но и менее длительные опасные нарушения. Условимся в число опасных включать нарушения длительностью не менее 0,1 с. Тогда по данным рис. 4.2 для сварки дугой прямой полярности $T_{\text{нар}} = 5 \times 0,1 + 0,2 + 2 \times 0,3 + 3 \times 0,4 + 1,0 = 3,5$ с, а обратной полярности — 0,1 с. Этот критерий дифференцирован лучше, чем частота обрывов $n_{\text{обр}}$, но может использоваться только вместе с ним, дополняя его. Действительно, его значение не может отражать удовлетворительную оценку устойчивости, если хотя бы одно нарушение в его составе окажется недопустимым, например, продлится более 0,3 с.

Для повышения объективности испытания устойчивости желательно устранить зависимость оценки от квалификации и внимательности сварщика. С этой целью можно использовать автоматическую установку для сварки штучными (покрытыми) электродами (рис. 4.4, а). В основе установки — подающий механизм 4 трактора АДС-1000, переоборудованный для подачи покрытого электрода. С этой целью он дополнен шестерней 5 и рейкой 6, на которой крепится токоподвод 7 с электродом 8. Наплавляемый образец 9 размещается на столе 10 с другим токоподводом. Имеются также электромеханический привод 2 шарового перемещения, ручной привод 3 поперечного перемещения и панель управления 1. Автоматический регулятор напряжения трактора обеспечивает плавную подачу электрода по мере плавления и стабилизацию длины дуги с точностью $\pm 0,5\text{--}0,7$ мм относительно заданного значения 3–5 мм.

С использованием автоматической установки продублирована часть экспериментов на выпрямителе ВД-306Э. Как видно в табл. 4.2, результаты оценки устойчивости такой автоматической наплавки в основном совпадают с показанными при ручном ведении процесса. Но

такое аппаратное усложнение эксперимента не привело к уточнению его результатов. Можно предполагать даже утрату репрезентативности эксперимента из-за устранения типичных возмущений, произвольно вводимых сварщиком в естественный процесс ручной сварки. Это дает основание для отказа от автоматической подачи электрода при массовых испытаниях источников для ручной сварки, но не препятствует ее использованию во вспомогательном исследовательском эксперименте.

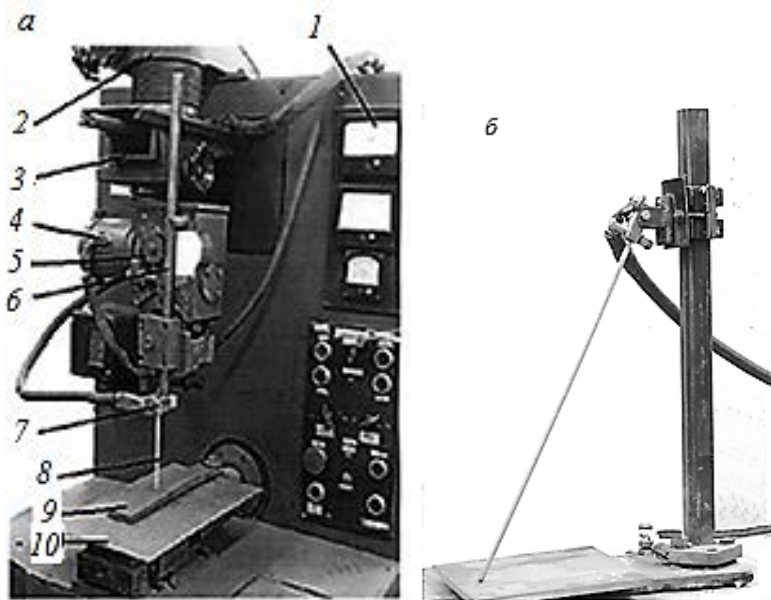


Рис. 4.4. Автоматическая наплавка штучным покрытым электродом для оценки устойчивости процесса: а — автоматическая установка, б — штатив

Другой вариант устранения субъективного фактора заключается в использовании удобного средства малой механизации — штатива для сварки наклонным электродом (рис. 4.4, б). В работе [44] при выполнении наплавочного валика наклонным электродом диаметром 4 мм типа *E6013* на токе 160 А получен очень устойчивый и стабильный по величине тока и напряжения процесс (средний коэффициент вариации тока 0,01 при максимуме 0,06). Однако, несмотря на мелкокапельный перенос электродного металла, процесс характеризуется аномально высокой частотой коротких замыканий каплями. Это объясняется чрезмерно короткой дугой, характерной для сварки наклонным электродом с опиранием на нерасплавленную втулочку покрытия высотой всего 1–2 мм. Таким образом, достоинства наплавки наклонным электродом, как и в

случае автоматической установки, обращаются недостатками при оценке устойчивости по причине неадекватности естественным условиям ручной сварки.

Минимально возможный сварочный ток $I_{\text{свmin}}$ — непосредственный критерий, характеризующий запас устойчивости по току. Его определяют при наплавке валика с плавным снижением тока с помощью регулятора источника (рис. 4.5, а). Нарушения процесса начинаются после значительного снижения тока относительно его нормального значения и часто совпадают с моментами переноса электродных капель. После отрыва капли от электрода скачком удлиняется, что при снизившейся мощности источника приводит к обрыву. Но обычно процесс сварки нарушается из-за затяжки короткого замыкания и прилипания капли к ванне.

Типичные значения тока $I_{\text{свmin}}$ в 2–4 раза меньше нормального тока, рекомендуемого для соответствующего электрода (табл. 4.2). Ток $I_{\text{свmin}}$ зависит от диаметра и марки электрода (типа электродного покрытия). Это необходимо учитывать при постановке эксперимента, чтобы в его результатах выделить роль именно характеристик источника. Часть экспериментов на выпрямителе ВД-306Э, показанных в табл. 4.2, продублированы на автоматической установке для наплавки штучными электродами. Видно, что и по этому показателю результаты автоматической и ручной наплавки близки.

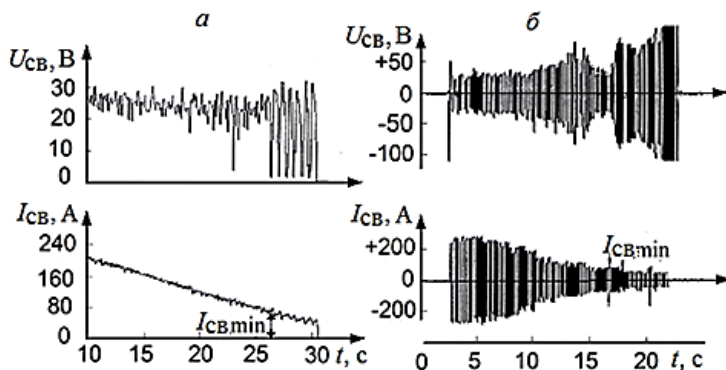


Рис. 4.5. Снижение тока при ручной сварке: а — выпрямитель ВДУ-506МТ, электрод ОЗС-4 Ø6 мм; б — трансформатор ТДМ-401, электрод ОЗС-4 Ø4 мм.

Разрывная длина дуги $l_{\text{др}}$ — непосредственный критерий эластичности дуги, характеризующий запас устойчивости по длине дуги (табл. 4.2). Методика определения $l_{\text{др}}$ с использованием штатива подробно пояснена выше в разд. 1.2.2.

Таблица 4.2.

*Непосредственные критерии устойчивости
при ручной сварке на постоянном токе*

Источник		ВД-306Э			ВДУ-506МТ				АДД-2х2501		
Диаметр электрода, мм		3	4	5	2	3	4	5	3	4	5
Марка электрода		УОНИ13/55			МР-3	УОНИ13/55					
Сварочный ток, А (нормальный)		100	150	200	60	100	150	200	100	150	200
Полярность дуги		обратная									
Частота обрывов $\rho_{обр. раз/эл}$	нормальный ток**	0/0	0/0	0/0	0	0	0	0	0	0	0
	пониженный ток (вертикальное положение)	7	7	–	0	0	–	0,5	0	2	–
	минимальный ток **	18/5	0/0	–	–	–	–	1	–	1	
Минимально возможный сварочный ток $I_{свmin}$, А**		45*/40	45/50	55/45	17*	40	28*	40	28*	28*	70
Разрывная длина дуги $l_{др}$, мм		15	13	14		13	17	17			

* дуга горит при минимальном токе источника

** в числителе при ручном ведении процесса, в знаменателе — при автоматической наплавке штучными электродами.

Примечание: жирным шрифтом выделены неудовлетворительные результаты
Примечания:

ВД-306Э — диодный выпрямитель, $U_x = 65-68$ В, наклон характеристики на пересечении с характеристикой условной рабочей нагрузки $\rho_{ир} = -0,55...-0,25$ В/А;

ВДУ-506МТ — тиристорный выпрямитель, $U_{x1} = 90$ В, $U_{x2} = 55$ В, $\rho_{из} = -5$ В/А (см. рис. 4.26);

АДД-2х2501 — агрегат с вентильным двухпостовым генератором ГД-2х2502, $U_x = 80$ В, $\rho_{ир} = -1,2...-0,12$ В/А;

ЧПР-315 — чоппер с выпрямителем ВДМ-1201, $U_x = 80$ В, $\rho_{ир} = -1,5...-0,9$ В/А.

Таблица 4.2. (продолжение)

Источник		ЧПР-315 с ВДМ-1201							
Диаметр электрода, мм		2	3,2	4	5	3,2	4	3,2	4
Марка электрода		ОЗС-12	LB52 U	OK 53.70	УОНИ 13/55	Fox Cel			
Сварочный ток, А (нормальный)		60	110	150	200	110	150	110	150
Полярность дуги		обратная						прямая	
Частота обрывов $n_{обр}$, раз/эл	нормальный ток	0	0	0	0	0,5	0	1	0
	пониженный ток (вертикальное положение)	0	0	0,5	0	0	0	3	0,5
	минимальный ток	0	0	0	–	0	0	5	5
Минимально возможный сварочный ток $I_{сmin}$, А		–	43	68	95	72	100	65	100
Разрывная длина дуги $l_{др}$, мм		–	–	18	18	10	15	15	15

Примеры оценки устойчивости процесса ручной сварки при испытании нескольких источников, различающихся по принципу действия и электрическим характеристикам, приведены в табл. 4.2. В первую очередь обратим внимание на результаты эксперимента по определению частоты обрывов на нормальных для конкретного электрода токах — почти во всех случаях устойчивость абсолютно высока ($n_{обр} = 0$). Но эксперименты при пониженных режимах для сварки вертикальных швов, а также на минимальных токах позволяют выделить источники с низким запасом устойчивости по току, например, выпрямитель ВД-306Э. Здесь пониженная устойчивость объясняется сравнительно низким напряжением холостого хода. Из данных табл. 4.2 также следует, что чоппер ЧПР-315 в комбинации с многопостовым выпрямителем ВДМ-1201, безупречный в отношении устойчивости при сварке на нормальных режимах электродами с рутиловым и основным покрытием, не является таким при сварке на минимальных режимах электродами с целлюлозным покрытием *Fox Cel* ($n_{обр}$ — до 5 раз/эл).

Отметим также закономерную связь между собой непосредственных критериев — для режимов с большой частотой обрывов, как правило, выше минимально возможный сварочный ток и ниже разрывная длина дуги.

4.2.2. Механизированная и автоматическая сварка плавящимся электродом.

Частота обрывов дуги $n_{обр}$ — непосредственный критерий устойчивости дугового процесса. При этих способах он соотносится с временем сварки — $n_{обр}$ [раз/мин] — или с длиной шва — $n_{обр}$ [раз/м]. Крите-

рий предложен по аналогии с ручной сваркой покрытым электродом, но востребован меньше, потому что при механической подаче электрода сварочный процесс устойчивей, чем при ручной. Нарушения дугового процесса связаны с возмущениями как в источнике, так и в механизме подачи электродной проволоки.

Минимально допустимая скорость подачи электродной проволоки $V_{\text{подmin}}$ — непосредственный критерий, характеризующий устойчивость процесса механизированной и автоматической сварки плавящимся электродом. *Минимально возможный сварочный ток* $I_{\text{свmin}}$ — другой непосредственный критерий устойчивости, но вторичный по отношению к $V_{\text{подmin}}$, поскольку задается этой скоростью, но также зависит от диаметра и вылета проволоки и других условий.

Скорость $V_{\text{подmin}}$ определяют при наплавке валика с плавным снижением частоты вращения подающего механизма. На рис. 4.6, а с масштабом горизонтальной развертки 1 с/дел видно, как пропорционально скорости подачи снижается и сварочный ток, что, очевидно, и приводит к нарушению процесса.

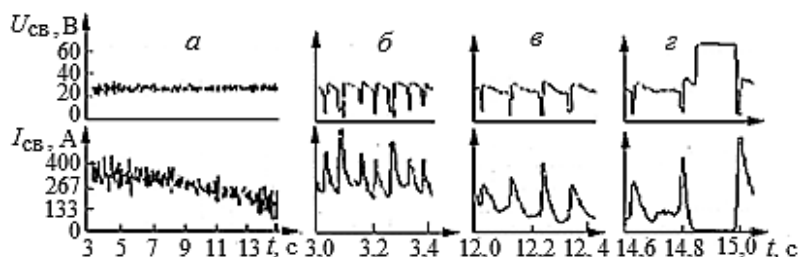


Рис. 4.6. Снижение скорости подачи при механизированной сварке в углекислом газе: а — 6,2 → 1,6 м/мин, 320 → 120 А; б — 6,2 м/мин; в — 2,8 м/мин; г — 1,6 м/мин (ВДУ-306МТ + ПДГО-512, проволока Св-08Г2С Ø1,6 мм, 25 В)

На развертках с масштабом 10 мс/дел той же осциллограммы (рис. 4.6, б, в, г) можно проследить динамику обеих стадий сварочного процесса с технологическими короткими замыканиями. Видно, что замедление подачи приводит к удлинению стадии горения дуги, а длительность коротких замыканий практически не изменяется. В конце эксперимента после переноса очередной капли медленная подача проволоки не дает дуге возможности восстановиться — происходит ее обрыв (рис. 4.6, г). Типичные значения $V_{\text{подmin}}$ при механизированной сварке в углекислом газе — от 1,4 до 1,8 м/мин. Неустойчивый процесс с обрывами и утыканиями проволоки длительностью до 200 мс, после которых на непродолжительное время восстанавливается регулярное чередование дуговой и контактной стадий, наблюдается еще при скоростях подачи около 0,8–1 м/мин. Но качество наплавленного валика в диапазоне скоростей 0,8–1,4 м/мин абсолютно неудовлетворительно, что дает весомое основание ограниче-

нию минимально допустимой скорости значениями 1,4–1,8 м/мин. Несколько снизить $V_{\text{подmin}}$ внутри этого интервала удастся, если использовать высоковольтную подпитку, как это и сделано в выпрямителе ВДУ-306МТ. В частности, видно (табл. 4.3), что при сварке проволокой диаметром 0,8 мм, несмотря на сильную пульсацию тока на низких режимах, устойчивый процесс обеспечивается именно подпиткой с током 20 А.

Приведем также статистические данные по величине $I_{\text{свmin}}$ для конвенциональных источников, полученные другими исследователями при сварке в CO_2 [226]. Они отвечают соотношению $I_{\text{свmin}} = e^{2,1+2d_3}$. Так, для электродов диаметром 0,8; 1,2 и 1,6 мм $I_{\text{свmin}}$ соответственно равен 40; 90 и 200 А. В наших экспериментах, как видно в табл. 4.3, эти величины ниже, т.е. лучше. Это объясняется, как уже отмечалось, наличием у современного сварочного оборудования специальных функций: у выпрямителя ВДУ-306МТ — низковольтной и высоковольтной подпиток, а у подающего механизма ПДГО-512 — плавного разгона.

Следует различать минимально возможный сварочный ток $I_{\text{свmin}}$ и минимальный ток дуги $I_{\text{дmin}}$. Сварочный ток $I_{\text{свmin}}$ получается усреднением высокого тока короткого замыкания и низкого тока дуги за несколько микроциклов, и в приведенных экспериментах составил от 20 до 120 А. Он является технологической характеристикой процесса, поскольку при таком токе еще можно получать качественный шов. Ток дуги $I_{\text{дmin}}$ в этих же экспериментах значительно меньше и составил 7–50 А. В работе [208] эту характеристику определяли не при снижении скорости подачи, а при увеличении сопротивления $R_{\text{вн}}$ сварочной цепи. Для этих же диаметров проволоки получили $I_{\text{дmin}} = 2\text{--}4$ А. Но это чисто физическая характеристика дугового разряда, удерживающегося в течение не более 20 мс.

Таблица 4.3.

*Минимально устойчивые режимы механизированной сварки
плавящимся электродом в углекислом газе
(выпрямитель ВДУ-306МТ с подающим механизмом ПДГО-512)*

Диаметр проволоки, мм	Снижение скорости подачи			Снижение напряжения источника	
	Режим	$V_{\text{подmin}}$, м/мин	$I_{\text{свmin}}$, А	Режим	$U_{\text{свmin}}$ В
0,8	10→1,1 м/мин, 19 В	1,4	20 (подпитка)	7,5 м/мин, 100 А	17
1,2	3,3→1,2 м/мин, 22 В	1,5	65	6 м/мин, 100 А	15
1,6	6,2→0,8 м/мин, 25 В, 0,6 мГн	1,8	120	4 м/мин, 250 А	16
1,6	6,2→0,8 м/мин, 25 В, 0,015 мГн	1,6	100	5,5 м/мин, 350 А	18

При автоматической сварке под флюсом [45] отмечено, что минимально возможный ток зависит от рода тока и наличия подпитки. Так, при использовании источника переменного тока для электродов диаметром 2–5 мм $I_{свmin}$ составил от 290 до 640 А, а на постоянном токе соответственно $I_{свmin} = 150–470$ А. В случае же использования источника постоянного тока с комбинированной внешней характеристикой $I_{свmin}$ снизился еще на 20–40 % — для тех же электродов соответственно до 120–280 А.

Минимально возможное сварочное напряжение $U_{свmin}$ — непосредственный критерий, характеризующий устойчивость процесса механизированной и автоматической сварки плавящимся электродом. Его определяют при наплавке валика с плавным снижением напряжения регулятором источника (табл. 4.3). На рис. 4.7 видно, что при снижении напряжения источника увеличиваются продолжительность стадии короткого замыкания, а к концу эксперимента и его амплитуда. При этом прекращение процесса происходит из-за утыкания проволоки в изделие. Типичное значение $U_{свmin} = 15–18$ В, оно может быть понижено в этом интервале за счет введения низковольтной подпитки — эта функция также реализована в выпрямителе ВДУ-306МТ (см. разд. 4.5.3 и рис. 4.28).

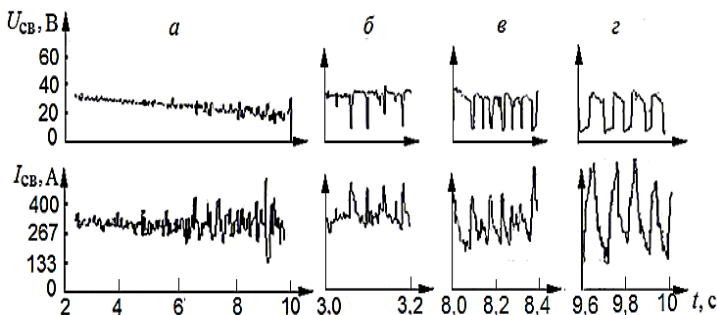


Рис. 4.7. Снижение напряжения при механизированной сварке в углекислом газе: а — 30→16 В; б — 30 В; в — 22 В; г — 16 В (выпрямитель ВДУ-306МТ с подающим механизмом ПДГО-512, проволока Св-08Г2С Ø1,6 мм, 4 м/мин)

4.2.3. Аргодуговая сварка неплавящимся электродом.

Частота нарушений дугового процесса при этом способе также соотносится с временем сварки — [раз/мин] или с длиной шва — [раз/м]. Дуга прямой полярности на нормальных и пониженных токах не склонна к обрывам. Для практики имеет значение только фиксирование коротких замыканий, особенно при сварке высоколегированных сталей и сплавов, а также

титановых сплавов, для которых попадание в шов частиц вольфрама с электрода абсолютно недопустимо.

Минимально возможный ток источника (или подпитки) при аргодуговой сварке неплавящимся электродом, достаточный для удержания дуги постоянного тока, зависит от полярности дуги и диаметра электрода. Например, для электрода ЭВЛ диаметром 6 мм при прямой полярности $I_{\text{свmin}} = 8$ А.

Особенно остро проблема определения $I_{\text{свmin}}$ стоит при сварке сверхмалых толщин (на практике не менее 0,15 мм). Для этих целей используется так называемая малоамперная дуга на токах от 1 до 25 А. Так, при сварке нержавеющей стали толщиной 0,19 мм электродом диаметром 0,3 мм устойчивый процесс достигается, начиная с $I_{\text{свmin}} = 2$ А [46]. Устойчивость при сварке малоамперной дугой снижается из-за смещения дуги от торца вверх по боковой поверхности электрода. Для устранения этого принимают меры к интенсивному нагреву торца: уменьшают диаметр электрода или заостряют его «на иглу» с углом до 15°, а также предпочитают зажигание дуги коротким замыканием.

4.3. Косвенные критерии устойчивости на постоянном токе

При анализе устойчивости дугового процесса уже с 40-х годов прошлого века используют методы теории автоматического управления [6, 47, 48, 49, 97]. Для разных способов сварки выполним теоретический анализ хода электрических процессов с целью выделения наиболее значимых критериев оценки устойчивости. По результатам анализа также сформулируем приемы воздействия на устойчивость энергетической системы «источник–дуга» или «источник–подающий механизм–дуга».

4.3.1. Ручная сварка покрытым электродом [50]

Асимптотическая устойчивость энергетической системы анализируется по виду описывающих ее дифференциальных уравнений. В энергетической системе ручной сварки с помощью вольт-амперных характеристик источника и дуги покажем изменение электрических параметров при возмущении по длине дуги (рис. 4.8, а). В исходном состоянии система находится в энергетическом равновесии, соответствующем точке B_1 на пересечении статических характеристик «Источник» и «Дуга 1». При малом возмущении по длине дуги $\tilde{\Delta}l_d > 0$ ее статическая характеристика сместится в положение «Дуга 2». При этом происходит нарушение равновесия в энергетической системе, поэтому баланс напряжений будет таким

$$L \frac{d\Delta I_d}{dt} + (\rho_d - \rho_n) \Delta I_d = -\varepsilon_{\text{ст}} \tilde{\Delta} l_d, \quad (4.1)$$

где L — индуктивность сварочной цепи,

$\rho_d = dU_d/dI_d$ и $\rho_n = dU_n/dI_d$ — дифференциальные сопротивления дуги и источника в точке B_1 (наклоны их статических вольт-амперных характеристик),

$\epsilon_{ст}$ — градиент потенциала в столбе дуги.

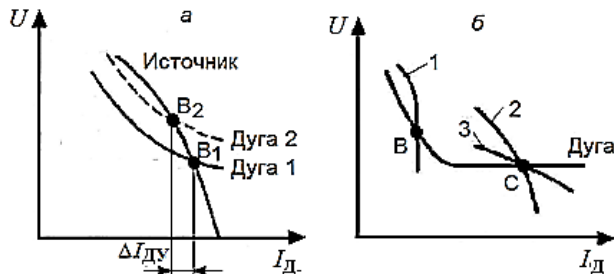


Рис. 4.8. Переходный процесс при возмущении по длине дуги в энергетической системе (а) и согласование характеристик источника и дуги при ручной сварке (б)

В результате начнется переходный процесс, и система придет в новое состояние равновесия в т. B_2 . В переходном процессе отклонение тока ΔI_d плавно нарастает по закону уравнения (4.2), пока не установится на постоянном уровне $\Delta I_{ду}$ —

$$\Delta I_d = -\frac{\epsilon_{ст}\tilde{\Delta I_d}}{\rho_d - \rho_n} \left(1 - e^{-\frac{\rho_d - \rho_n}{L}t}\right) \quad (4.2)$$

Поскольку возмущение $\tilde{\Delta I_d}$ мало, то и установившееся отклонение тока $\Delta I_{ду}$ мало, что позволяет сделать заключение об асимптотической устойчивости системы «источник–дуга».

Рассмотрим условия обеспечения устойчивости. Известно, что устойчивость энергетической системы, описываемой дифференциальным уравнением первого порядка, по Раусу–Гурвицу обеспечивается при положительных коэффициентах уравнения (4.1):

- 1) $L > 0$,
- 2) $\rho_d - \rho_n > 0$.

Поскольку в первом условии L всегда больше нуля, то подлежит анализу только второе условие. Для обеспечения устойчивости энергетической системы «источник постоянного тока–дуга» при ручной сварке необходимо и достаточно [2], чтобы

$$k_y = \rho_d - \rho_n > 0. \quad (4.3)$$

Коэффициент устойчивости k_y — косвенный критерий асимптотической устойчивости процесса ручной сварки при малых возмущениях.

Уравнение (4.3) положено в основу выбора источника в зависимости от наклона характеристики дуги (рис. 4.8, б). На пересечении с падающим участком характеристики дуги в точке В источник должен иметь еще более круто падающую характеристику 1. А на пересечении с жестким участком характеристики дуги в точке С устойчивость обеспечивается как при использовании источника с пологопадающей 3, так и с крутопадающей 2 характеристикой. Но выше запас устойчивости в последнем случае, где k_y больше.

4.3.2. Механизированная и автоматическая сварка плавящимся электродом с постоянной скоростью подачи.

Функциональная схема системы автоматического регулирования дуги саморегулированием (АРДС) приведена на рис. 4.9, а. Задатчик тока ЗТ формирует сигнал $U_{зт}$ управления током дуги I_d , хотя фактически настраивает только скорость подачи $V_{под}$. Сигнал задания усиливается тиристорным (транзисторным) регулятором ТР до величины $U_{тр}$ и подается на двигатель М. С двигателя вращение через редуктор Р передается на ролик, перемещающий проволоку в дугу, питаемую источником ИП. Частота вращения двигателя ω , а поэтому и скорость подачи $V_{под}$, в процессе сварки поддерживаются постоянными — в этом состоит отличительная особенность системы саморегулирования.

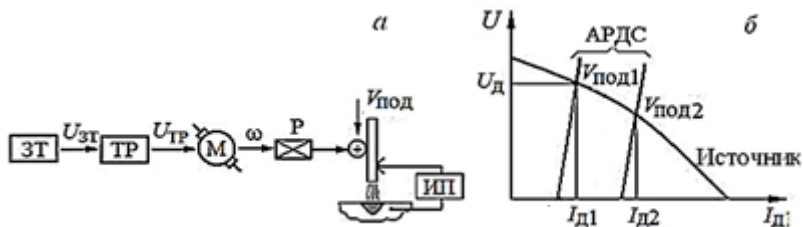


Рис. 4.9. Система саморегулирования АРДС: а — функциональная схема, б — статические характеристики

Принцип саморегулирования положен в основу обеспечения устойчивого горения дуги при сварке с постоянной скоростью подачи электродной проволоки [238]. Саморегулирование дуги объясняется ее способностью при умеренных возмущениях восстанавливать свою длину за счет изменения скорости пла

вления электрода $V_{\text{пл}}$. Скорость плавления увеличивается с увеличением тока и уменьшением напряжения:

$$\Delta V_{\text{пл}} = k_{\text{ст}} \Delta I_{\text{д}} - k_{\text{сн}} \Delta U_{\text{д}}. \quad (4.4)$$

Здесь $k_{\text{ст}} = \Delta V_{\text{пл}} / \Delta I_{\text{д}} \left[\frac{\text{см}}{\text{с} \cdot \text{А}} \right]$ — коэффициент саморегулирования по току — зависит от диаметра и теплофизических характеристик материала электрода. Например, для стального электрода $k_{\text{ст}} = 0,00453 \alpha_{\text{р}} / d_{\text{э}}^2$, где $\alpha_{\text{р}}$ — коэффициент расплавления электродного металла $[\text{г}/\text{А} \cdot \text{ч}]$. Коэффициент саморегулирования по напряжению $k_{\text{сн}} = \Delta V_{\text{пл}} / \Delta U_{\text{д}} \left[\frac{\text{см}}{\text{с} \cdot \text{В}} \right]$. Влияние напряжения на скорость плавления менее значительно, чем тока.

Саморегулирование наиболее отчетливо проявляется в виде реакции на возмущение по длине дуги $\Delta I_{\text{д}}$. Например, при подходе дуги к ранее выполненной прихватке дуга резко укорачивается, что могло бы привести к короткому замыканию электрода на изделие. Но вместе с длиной снижается и напряжение, и при пологопадающей характеристике источника резко увеличивается ток. По (4.4) увеличивается скорость плавления электрода, что приводит к увеличению длины дуги, точнее, к ее восстановлению до исходного значения:

$$I_{\text{д}} \downarrow \Rightarrow U_{\text{д}} \downarrow \Rightarrow I_{\text{д}} \uparrow \Rightarrow V_{\text{пл}} \uparrow \Rightarrow I_{\text{д}} \uparrow.$$

Возмущение по длине дуги отрабатывается полностью — без статических ошибок. Большинство других возмущений при их умеренной величине система АРДС также отрабатывает, хотя и со статическими ошибками.

Система саморегулирования освобождает сварщика от обязанности непрерывно поддерживать дугу. Но она не имеет в своем составе автоматического регулятора, и ее надежная работа возможна только в сравнительно узком диапазоне изменения параметров ее частей «источник—подающий механизм—дуга». Уравнение статической характеристики системы саморегулирования

$$I_{\text{д}} = \frac{V_{\text{под}}}{k_{\text{ст}}} + \frac{k_{\text{сн}}}{k_{\text{ст}}} U_{\text{д}}. \quad (4.5)$$

На рис. 4.9, б приведено графическое изображение характеристики АРДС. На ее пересечении с характеристикой источника имеем точку установившегося режима с током $I_{\text{д1}}$ ($I_{\text{д2}}$) и напряжением $U_{\text{д}}$.

Условия обеспечения асимптотической устойчивости системы АРДС выясним по анализу дифференциального уравнения для тока при малом возмущении по длине дуги $\tilde{\Delta}l_d$:

$$L \frac{d^2 \Delta I_d}{dt^2} + (\rho_d - \rho_{и} + R_{вн} + L \varepsilon_{ст} k_{сн}) \frac{d \Delta I_d}{dt} + \varepsilon_{ст} [k_{ст} - k_{сн} (\rho_{и} - R_{вн})] \Delta I_d = -\varepsilon_{ст} \frac{d \tilde{\Delta} l_d}{dt}. \quad (4.6)$$

Для обеспечения устойчивости системы, описываемой дифуравнением второго порядка, по Раусу–Гурвицу необходимо и достаточно, чтобы все коэффициенты при ΔI_d были положительны:

- 1) $L > 0$;
- 2) $\rho_d - \rho_{и} + R_{вн} + L \varepsilon_{ст} k_{сн} > 0$;
- 3) $\varepsilon_{ст} [k_{ст} - k_{сн} (\rho_{и} - R_{вн})] > 0$.

Первое условие выполняется всегда. Второе условие представляет собой коэффициент устойчивости системы АРДС

$$k_y = \rho_d - \rho_{и} + R_{вн} + L \varepsilon_{ст} k_{сн} > 0 \quad (4.7)$$

Поскольку при механизированной и автоматической сварке $\rho_d \geq 0$, условие выполняется при $\rho_{и} < 0$, т.е. при падающей характеристике источника. Но в сравнении с рассмотренной ранее простейшей системой «источник–дуга» при ручной сварке, характеризуемой уравнением (4.3), здесь больше запас устойчивости, поскольку, как правило, $L \varepsilon_{ст} k_{сн} > 0$. Устойчивость повышается также при увеличении сопротивления внешней сварочной цепи $R_{вн}$ (сварочные провода, вылет проволочного электрода, скользящий контакт токоподвода), что ранее не учитывалось. Третье условие выполняется практически всегда, поскольку при реальных сочетаниях параметров $k_{ст} - k_{сн} (\rho_{и} - R_{вн}) > 0$. Для повышения запаса устойчивости необходимо увеличивать наклон падающей внешней характеристики источника ($|\rho_{и}| \uparrow$), и уменьшать диаметр электрода ($k_{ст} \uparrow$).

Переходный процесс по току при скачкообразном возмущении по длине дуги ($\tilde{\Delta}l_d = \text{const}$) описывается уравнением в виде:

$$\Delta I_d = -\frac{\varepsilon_{ст} \tilde{\Delta} l_d}{L \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)} \left(e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}} \right), \quad (4.8)$$

где T_1 и T_2 — постоянные времени, зависящие от характеристик источника, сварочной цепи, дуги и электрода.

График аperiodического переходного процесса по этому уравнению при $\tilde{\Delta}l_d < 0$ приведен на рис. 4.10, а. Видно, что отклонение тока ΔI_d сначала увеличивается до $\Delta I_{\text{дин}}$, а затем уменьшается до 0, т.е. си-

стема АРДС при таком возмущении устойчива. Более того, она еще и астатическая, поскольку статическая ошибка регулирования

$$\Delta I_{\text{стат}} = I_{\text{ду2}} - I_{\text{ду1}} = 0.$$

Важными свойствами систем автоматического регулирования являются быстродействие и характер переходного процесса, а также статические и динамические ошибки регулирования. Ошибки будут рассмотрены в разд. 6.4.2.

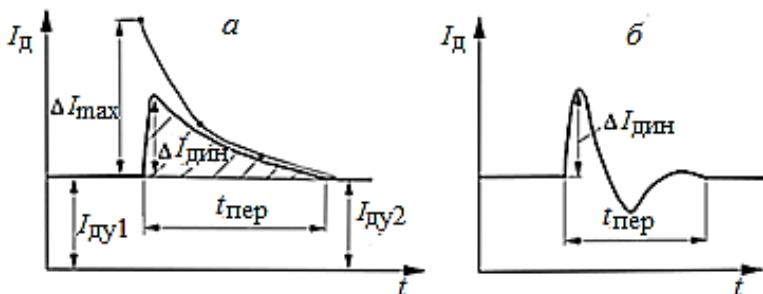


Рис. 4.10. Аperiodический (а) и колебательный (б) переходные процессы в системе АРДС при возмущении по длине дуги $\Delta l_d < 0$

Быстродействие системы АРДС можно оценить по времени переходного процесса:

$$t_{\text{пер}} \approx \frac{6L}{-\rho_{\text{и}} - \sqrt{\rho_{\text{и}}^2 - 4L\varepsilon_{\text{ст}}k_{\text{ст}}}} \quad (4.9)$$

При механизированной сварке в защитных газах проволоками от 0,6 до 2,0 мм порядок величин $t_{\text{пер}}$ от 0,1 до 0,5 с, при автоматической сварке под флюсом более толстыми проволоками — более 0,8 с [8, 48, 49, 160]. Для ускорения переходного процесса ограничивают индуктивность L сварочной цепи, снижают диаметр d , электродной проволоки (для увеличения $k_{\text{ст}}$), снижают наклон внешней характеристики (уменьшают $|\rho_{\text{и}}|$).

Характер переходного процесса может быть аperiodическим или колебательным (рис. 4.10). Для обеспечения более благоприятного аperiodического процесса обязательно выполнение условия

$$\rho_{\text{и}}^2 - 4L\varepsilon_{\text{ст}}k_{\text{ст}} > 0. \quad (4.10)$$

Видно, что для предотвращения раскачки системы следует увеличивать наклон внешней характеристики, уменьшать индуктивность сварочной цепи и увеличивать диаметр проволоки (уменьшать $k_{\text{ст}}$).

Косвенные критерии устойчивости системы саморегулирования назначаются с одновременным учетом требований асимптотической

устойчивости, высокого быстродействия и отсутствия колебаний, а также уменьшения ошибок регулирования.

Наклон внешней характеристики источника $\rho_{\text{н}}$ — косвенный критерий, величина которого назначается на основе компромисса между требованиями устойчивости ($|\rho_{\text{н}}|\uparrow$) и быстродействия ($|\rho_{\text{н}}|\downarrow$). На этом основании стандартом ГОСТ 60974-1-2012 сформулирован единый термин «жесткая внешняя характеристика», обобщающий использовавшиеся ранее нечеткие термины «пологопадающая, жесткая, пологовозрастающая». Жесткая характеристика по ГОСТ имеет наклон от $-0,07$ до $+0,1$ В/А как специфический атрибут источников в составе системы саморегулирования. Этот интервал подтверждается и прямыми технологическими исследованиями. Так, в фундаментальной работе [53] для механизированной сварки в углекислом газе проволоками от 0,5 до 1,4 мм проверен и рекомендован интервал наклонов от $-0,08$ до $+0,04$ В/А.

При механизированной сварке в аргоне источник может иметь более крутой наклон характеристики — от $-0,2$ до $-0,04$ В/А. Для автоматической сварки под флюсом проволоками до 4–5 мм оптимальный наклон от $-0,1$ до $-0,01$ В/А.

Индуктивность сварочной цепи L — косвенный критерий устойчивости, значения которого также определяются требованиями быстродействия и отсутствия колебаний. В предположении уже принятых диаметра проволоки и наклона характеристики источника из (4.10) можно сформулировать ограничение индуктивности для предотвращения раскочки системы саморегулирования:

$$L < \frac{\rho_{\text{н}}^2}{4\varepsilon_{\text{ст}}k_{\text{ст}}} \quad (4.11).$$

Правда, следует отметить, что при сварке в углекислом газе короткой дугой главным фактором, определяющим значения индуктивности, является разбрызгивание электродного металла. Эти значения находятся в интервале 0,1–1 мГн, их выбор в зависимости от диаметра электрода подробно поясняется в разд. 8.3.

Диаметр электродной проволоки $d_{\text{э}}$ — косвенный критерий устойчивости во всех ее аспектах, поскольку от величины диаметра зависят как принципиальная возможность реализации сварки, так и быстродействие, и характер переходного процесса. Хотя этот критерий не относится к электрическим характеристикам системы саморегулирования, но как и они оказывает существенное влияние на параметры плавления проволоки, в частности величину $k_{\text{ст}}$. Например, считается, что система саморегулирования при автоматической сварке под флюсом обеспечивает приемлемое быстродействие только с электродами диаметром до 4–5 мм. При механизированной сварке в защитных газах процесс само-

регулирования эффективен во всем диапазоне распространенных диаметров сплошной проволоки от 0,5 до 2,5 мм, а порошковой проволоки — до 4 мм.

Напряжение холостого хода U_x и скорость подачи проволоки $V_{\text{под}}$ — косвенные критерии, не учитываемые при анализе асимптотической устойчивости по уравнению (4.6)–(4.8), но влияющие на устойчивость при их больших возмущениях. Запас устойчивости увеличивается при увеличении U_x и до определенного уровня — при снижении $V_{\text{под}}$. Мотивированный выбор их значений приведен в разд. 4.7.2.

4.3.3. Сварка плавящимся электродом с автоматическим регулированием напряжения

Функциональная схема системы автоматического регулирования напряжения дуги за счет воздействия на скорость подачи электродной проволоки АРНД_V приведена на рис. 4.11, а. Здесь сигнал обратной связи в виде напряжения U_d с помощью устройства сравнения УС сопоставляется с уставкой $U_{\text{зн}}$, настроенной в задатчике напряжения ЗН. Разность $U_d - U_{\text{зн}}$ после усиления в тиристорном или транзисторном регуляторе ТР до значения $U_{\text{ТР}}$ поступает на якорь двигателя М. Двигатель, вращающийся с переменной частотой ω , с помощью редуктора Р перемещает проволоку со скоростью подачи $V_{\text{под}}$.

Принцип действия системы АРНД_V опирается на зависимость скорости подачи проволоки от напряжения дуги

$$V_{\text{под}} = k_{\text{рн}}(U_d - U_{\text{зн}}), \quad (4.12)$$

где $k_{\text{рн}}$ — коэффициент усиления регулятора $\left[\frac{\text{см}}{\text{с} \cdot \text{В}} \right]$.

Проанализируем работу системы при возмущении по длине Δl_d . Например, при укорочении дуги снизится ее напряжение, что по соотношению (4.12) приведет к снижению скорости подачи проволоки и, следовательно, к удлинению дуги, т.е. восстановлению дугового промежутка:

$$I_d \downarrow \Rightarrow U_d \downarrow \Rightarrow V_{\text{под}} \downarrow \Rightarrow I_d \uparrow.$$

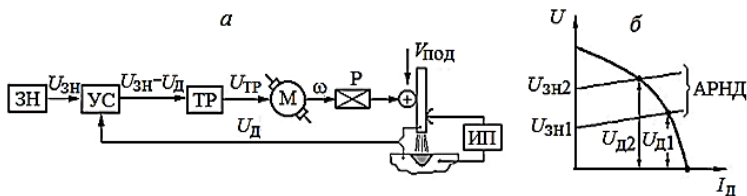


Рис. 4.11. Система АРНД_V: функциональная схема (а) и статические характеристики (б)

Уравнение статической характеристики системы АРНД_V

$$U_{\text{д}} = U_{\text{зн}} + \frac{k_{\text{ст}}}{k_{\text{рн}}} I_{\text{д}}. \quad (4.13)$$

Ее график (рис. 4.11, б) имеет вид, близкий к горизонтали, т.е. это система стабилизации напряжения дуги.

Для обеспечения устойчивости системы АРНД_V необходимо и достаточно выполнения следующих условий:

- 1) $L > 0$;
- 2) $-\rho_{\text{н}} + L\varepsilon_{\text{ст}}k_{\text{рн}} > 0$;
- 3) $k_{\text{ст}} - k_{\text{рн}}\rho_{\text{н}} > 0$.

Первое условие выполняется всегда. Второе выполняется при использовании источников с падающими характеристиками, поскольку у них $\rho_{\text{н}} < 0$. Но в сравнении с рассмотренной выше системой саморегулирования здесь больше запас устойчивости, поскольку $k_{\text{рн}} \gg k_{\text{сн}}$. Третье условие выполняется всегда, если выполнено второе условие.

Возмущение по длине дуги система АРНД_V отрабатывает астатически. Почти все другие возмущения она отрабатывает лучше, чем система АРДС — с меньшими динамическими и статическими ошибками. В ней, как правило, не бывает колебаний тока и напряжения в переходном процессе. Ее быстродействие существенно лучше, чем у системы АРДС.

Наклон внешней характеристики источника $\rho_{\text{н}}$ — косвенный критерий, величина которого может назначаться только по соображениям обеспечения устойчивости процесса и стабильности сварочного тока. Его типичные значения, легко достижимые в источниках без обратных связей — от $-0,3$ до $-0,07$ В/А, а в источниках с обратными связями наклон может быть еще круче.

Коэффициент усиления регулятора напряжения $k_{\text{рн}}$ — косвенный критерий, увеличение которого способствует повышению запаса устойчивости, стабильности напряжения, быстродействию, и отсутствию раскочки системы. Его типичные значения — от $0,2$ до 3 см/(с В).

4.3.4. Аргонодуговая сварка неплавящимся электродом

При ручной аргонодуговой сварке непрерывное горение дуги обеспечивается сварщиком за счет манипуляций горелкой с неплавящимся электродом. При автоматической сварке, например, тонкостенных конструкций, предъявляющей жесткие требования к устойчивости процесса, обязательна еще и стабилизация длины дуги с точностью не хуже $0,5$ мм. А в случае прецизионной сварки нержавеющей трубок требования к длине дуги еще жестче — отклонения не более $0,2$ мм [48]. Поэтому

такие установки комплектуются автоматическим регулятором напряжения или длины дуги.

Принцип действия системы автоматического регулирования напряжения дуги с воздействием на ее длину АРНД_л поясним с помощью рис. 4.12, а. Здесь напряжение дуги U_d в устройстве сравнения УС сопоставляется с напряжением $U_{зн}$ датчика ЗН. Разность $U_d - U_{зн}$ после усиления в регуляторе ТР подается на двигатель М с редуктором Р, осуществляющим вертикальное перемещение горелки по оси Z_r . Например, при укорочении дуги снизится ее напряжение, что приведет к срабатыванию привода на подъем горелки и, следовательно, удлинению дуги, т.е. восстановлению дугового промежутка:

$$l_d \downarrow \Rightarrow U_d \downarrow \Rightarrow Z_r \uparrow \Rightarrow l_d \uparrow.$$

В отличие от системы АРНД_v описываемая система АРНД_л имеет дискретный характер действия — двигатель срабатывает, только если отклонение напряжения превысит приемлемое значение.

На малых токах (менее 30 А) нарушается линейная зависимость напряжения от длины дуги. В этом случае используются системы автоматического регулирования длины дуги АРДД с пневматическими или фотоэлектрическими датчиками длины.

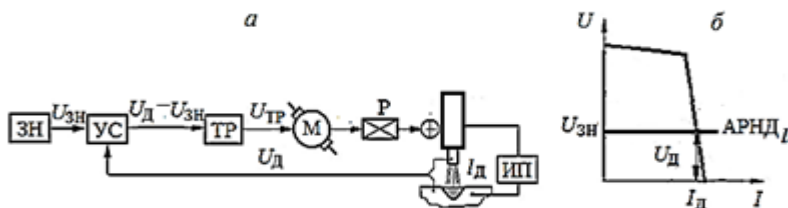


Рис. 4.12. Система АРНД_л: функциональная схема (а) и статические характеристики (б)

Статическая характеристика системы АРНД_л (рис. 4.12, б) имеет вид горизонтали:

$$U_d = U_{зн} \quad (4.14)$$

Главное условие обеспечения устойчивости аргонодуговой сварки совпадает с выведенным для ручной сварки покрытым электродом (4.3) — $k_y = \rho_d - \rho_n > 0$.

Коэффициент устойчивости k_y — косвенный критерий устойчивости как при ручном, так и при автоматическом процессе, позволяющий оценить пригодность источника по его паспортным данным. Поскольку при аргонодуговой сварке $\rho_d \leq 0$, то для обеспечения устойчи-

ности необходим источник с крутопадающей внешней характеристикой, у которого $\rho_{\text{н}} \ll 0$. При автоматической сварке тонкостенных конструкций требования к типу внешней характеристики источника ужесточаются — предпочтительна вертикально падающая. Для формирования такой характеристики эффективно одновременное использование положительной обратной связи по напряжению и отрицательной обратной связи по току [48].

4.4. Устойчивость при значительном удлинении дуги

4.4.1. Понятие эластичности дуги.

С позиций теории автоматического управления эластичность — это устойчивость энергетической системы «источник–дуга» при значительном удлинении дуги. Таким образом, эластичность зависит не только от технологических характеристик электрода и режима, но еще и от электрических параметров источника.

Наиболее актуальна проблема эластичности при ручной сварке покрытым электродом. При субъективной (экспертной) оценке эластичности по ГОСТ 25616-83 источник заслуживает 5 баллов, если дугу в процессе сварки удастся растянуть до тройного (или более) диаметра электрода. Но по современным представлениям разработчиков электродов и технологических процессов нежелательна не только меньшая, но и большая эластичность, поскольку она провоцирует сварщика к работе с длинной дугой, при которой не обеспечивается ни достаточная защита, ни качественное формирование шва. Например, в работе [51] высшему баллу эластичности соответствует только отношение разрывной длины дуги к диаметру электрода $l_{\text{др}}/d_{\text{э}} = 2,5\text{--}3$ (рис. 4.13). И уже при увеличении этого отношения более 6 оценка становится неудовлетворительной.

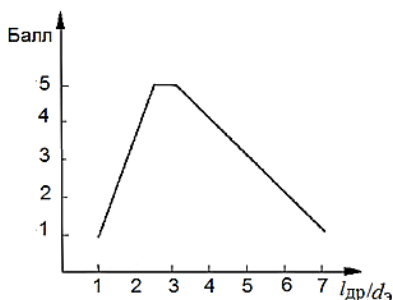


Рис. 4.13. Современная экспертная оценка эластичности [51]

Разрывная длина дуги $l_{др}$ — непосредственный критерий продольной (в направлении оси электрода) эластичности при ручной сварке покрытым электродом, не зависящий от сварщика и поэтому объективный. Впервые такая количественная характеристика была предложена акад. К.К. Хреновым в 1949 г. [52] именно для оценки устойчивости процесса (стабильности горения дуги, по терминологии автора). Обосновывалось это следующим образом: чем больше разрывная длина при горении дуги в стационарных условиях штатива, тем меньше вероятность обрывов при естественном динамическом состоянии движущейся при сварке дуги. С позиций современных представлений о физике дуги и методах анализа устойчивости энергетических процессов такой подход уязвим. Тем не менее, следует признать, что большинство технологических и электротехнических приемов, снижающих частоту обрывов, так же положительно влияют и на разрывную длину дуги, способствуя ее увеличению. К тому же за прошедшие годы в технической литературе накопилась масса информации с результатами измерения разрывной длины дуги в обоснование полезных усовершенствований источников, что не хотелось бы утратить.

Усовершенствованная конструкция штатива (см. рис. 1.6) позволяет приблизить эксперимент к естественным условиям зажигания и обрыва дуги при сварке [18, 19]. После кратковременного замыкания электрода на изделие он быстро отводится действием пружины на фиксированное расстояние — начальную длину дуги $l_{дн} = 2-3$ мм. Затем дуга горит, непрерывно удлиняясь до конечного расстояния при обрыве — разрывной длины $l_{др}$.

Поясним электрические процессы при удлинении дуги до обрыва с помощью той же осциллограммы (см. рис. 1.7), которая иллюстрировала начальное зажигание дуги в штативе. После зажигания следует интервал (5) сравнительно спокойного горения дуги с плавным увеличением ее длины и напряжения. При этом ток остается на приблизительно постоянном уровне 90 А. Наконец, при увеличении длины дуги до значения $l_{др} = 14$ мм происходит ее обрыв при токе $I_{об} = 80$ А и напряжении $U_{об} = 50$ В (6). Затем восстанавливается режим холостого хода с напряжением 80 В (7).

Для корректной оценки эластичности по разрывной длине следует регламентировать технологические условия эксперимента, например, по рекомендациям, изложенным во Введении. Причем при испытании источников постоянного тока для ручной сварки предлагается использовать электроды с основным покрытием УОНИ 13/55 на приведенных в табл. 4.1 нормальных режимах. Для источников переменного тока предлагается использовать электроды с рутиловым покрытием ОЗС-4.

Приемы воздействия на эластичность могут быть технологическими или электротехническими. Обращаем внимание на то, что в обоих случаях целью является не безоговорочное увеличение разрывной длины дуги, а только достижение ею оптимального уровня $l_{др} = (2,5-3)d_э$.

Технологические приемы воздействия на эластичность проверены в многочисленных экспериментах, часть из них отражена на рис. 1.8.

Разрывная длина:

— сильно зависит от типа электродного покрытия (для нескольких серийных источников у электродов с рутиловым покрытием ОЗС-4, ОЗС-12, МР-3, АНО-4 $l_{др} = 18-35$ мм, с основным покрытием УОНИ 13/55, ТМЛ-1У, LB52U, Kessel 5520 Мо, ОК 53.70 $l_{др} = 11-21$ мм, с целлюлозным покрытием Fox Cel, ВСЦ-4М $l_{др} = 10-15$ мм) — общеизвестный факт, связанный с ионизирующими свойствами электродных покрытий;

— почти не зависит от диаметра электрода при нормальном токе для каждого из этих диаметров;

— почти не зависит от настроенного тока в интервале 60–130 % от нормального для конкретного диаметра (отмеченная некоторыми исследователями прямая зависимость $l_{др}$ от настроенного тока в действительности имеет первичной причиной изменение напряжения холостого хода и сопротивления источника);

— зависит от полярности дуги (для электродов с рутиловым покрытием на прямой полярности $l_{др}$ на 20–30 % выше, чем на обратной, с основным и целлюлозным покрытием — на 10–15 %);

— на переменном токе не уступает значениям, полученным на постоянном токе при обратной полярности (для электродов с рутиловым покрытием соответственно 20–35 мм и 18–29 мм);

— неоднозначно связана с пространственным положением (на разных режимах больше то при нижнем, то при вертикальном положении).

Электротехнические зависимости эластичности, установленные в этих же экспериментах, представляют больший интерес в связи с проблематикой данной работы, поэтому подробно будут рассмотрены в следующих разделах. Но коротко, для разрывной длины отмечено:

— наиболее отчетлива прямая зависимость от напряжения холостого хода;

— менее отчетливая связь с наклоном внешней характеристики (при более пологом наклоне на участке малых токов, соответствующих обрыву, $l_{др}$ выше);

— прямая связь с величиной индуктивности сварочной цепи (дроссель полезен в цепи тиристорного выпрямителя и коллекторного генератора);

— положительная реакция на подпитку, высокочастотную пульсацию и импульсную стабилизацию дуги переменного тока [54].

Далее подробно рассмотрим зависимость эластичности от параметров источника для ручной сварки покрытым электродом, прежде всего — от вида внешней характеристики источника (монотонной или комбинированной).

4.4.2. Электрические параметры эластичности для конвенционального источника

Примером такого конвенционального источника с монотонно падающей внешней характеристикой является диодный выпрямитель ВД-306А с транзисторным регулятором — чоппером ЧПР-315. Для определения электрических параметров, характеризующих эластичность в широком диапазоне режимов, эксперимент выполнялся в штативе в трех вариантах:

- электрод диаметром 2 мм, марки ОЗС-12, установленный ток 50 А;
- диаметр 4 мм, УОНИ 13/55, 150 А;
- диаметр 6 мм, ОЗС-4, 315 А.

На рис. 4.14 показаны внешние характеристики источника, соответствующие этим режимам: сплошными жирными линиями — вольт-амперные $U_n = f(I_d)$, а штриховыми — ватт-амперные $P_n = f(I_d)$. Тонкими линиями со стрелками изображены траектории точек, снятых с осциллограмм и отражающих изменения сварочных тока и напряжения после зажигания до обрыва дуги.

Видно, что в момент обрыва дуги концу траектории на *вольт-амперной* характеристике с параметрами $U_{об}$ и $I_{об}$ соответствует максимум мощности на графике *ватт-амперной* характеристики. Это дает основание для объяснения физических причин обрыва. По мере удлинения дуги и роста ее напряжения до значения $U_{об}$ мощность P_n монотонно увеличивается до максимума. При последующем, даже небольшом удлинении дуги, вызванном, например, переносом капли электродного металла, мощность источника станет снижаться. А это, в свою очередь, приведет к охлаждению межэлектродного промежутка и дальнейшему снижению мощности за счет падения тока, и так до нуля, т.е. до обрыва дуги. Такой характер развития процессов виден и на осциллограмме рис. 1.7 вблизи точки 6 — при переносе последней капли напряжения дуги сначала снижается, а затем резко увеличивается, что и приводит к быстрому снижению тока и распаду плазмы столба дуги. И хотя последним толчком к прекращению дугового разряда могут быть небольшие сопутствующие возмущения, главной причиной обрыва удлиняющейся дуги служит нарушение равновесия между выделением энергии

источником и потреблением ее дугой. Происходит это слева, но вблизи от максимума ватт-амперной характеристики.

В теории электропривода такой режим с максимумом полезной мощности называется согласованным, он достигается при равенстве сопротивлений нагрузки и источника. Напряжение согласованного режима $U_{\text{сог}}$ зависит только от напряжения холостого хода и внутреннего сопротивления источника. В массовом эксперименте при условиях, приведенных на рис. 1.8, установлено, что значения напряжения обрыва дуги близки к напряжению согласованного режима — $U_{\text{об}} = (0,93\text{--}1,13)U_{\text{сог}}$. Видимо, пунктирная линия на рис. 4.14, соединяющая точки согласованных режимов для разных электродов, является границей зоны устойчивости системы «источник–дуга» при удлинении последней.

В рассмотренном примере (рис. 4.14), несмотря на широкий диапазон изменения тока — от 34 до 315 А, напряжение холостого хода было неизменным — 78 В. Поэтому и напряжение обрыва варьируется в сравнительно узком диапазоне 50–56 В (63–70 % от U_x) и практически не зависит от технологических условий.

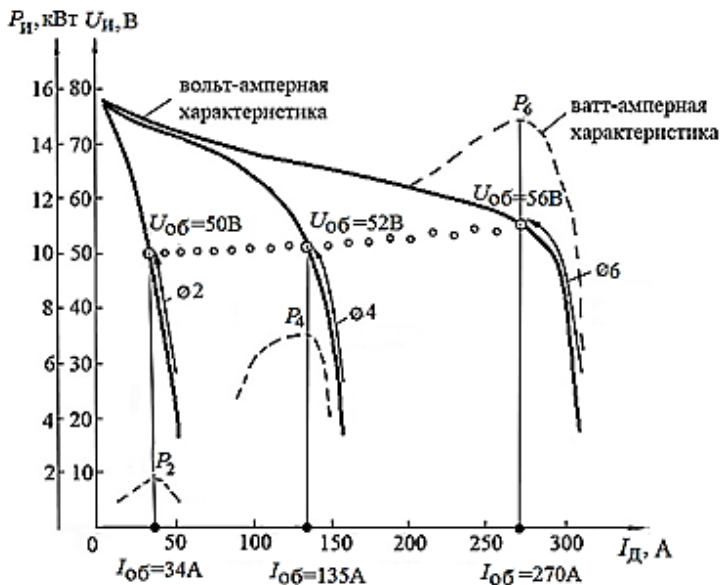


Рис. 4.14. Электрические характеристики выпрямителя ВД-306А с чоппером ЧПР-315 при оценке эластичности дуги

Напряжение обрыва дуги $U_{об}$ — наиболее репрезентативный непосредственный критерий эластичности для оценки источников. Он определяется в технологическом эксперименте объективным методом с использованием штатива. Этот критерий не зависит от свойств электродов и принятых режимов и к тому же энергетически хорошо мотивирован из-за наличия связи с напряжением холостого хода и наклоном внешней характеристики источника.

Напряжение согласованного режима $U_{сог}$ — косвенный критерий эластичности, близкий по величине к напряжению обрыва, но определяемый по внешним характеристикам источника или расчетом по его паспортным данным.

4.4.3. Электрические параметры эластичности для современного источника

В качестве такого источника с комбинированной вольт-амперной характеристикой принят тиристорный выпрямитель с МП-управлением марки ВДУ-506МТ. В эксперименте со штативом применялись электроды с рутиловым покрытием:

- диаметр 2 мм, ОЗС-12, с установленным сварочным током 60 А и током горячего пуска 90 А;

- диаметр 6 мм, ОЗС-4, соответственно 270 А, 400 А;

и электроды с основным покрытием:

- диаметр 2,5 мм, УОНИ 13/55, 80 А, 120 А;

- диаметр 3 мм, УОНИ 13/55, 100 А, 150 А;

- диаметр 4 мм, УОНИ 13/55, 150 А, 220 А;

- диаметр 5 мм, ТМЛ-1У, 200 А, 300 А.

Результаты эксперимента приведены на рис. 4.15. Здесь жирными линиями показана одна из вольт-амперных характеристик, состоящая из нескольких участков (1 — участок подпитки, 2 — жесткий участок основного выпрямительного блока с напряжением холостого хода $U_{х2} = 55$ В и наклоном $\rho_{и2} = -0,02$ В/А, 3 — переходный участок, 4 — вертикальный основной участок, с помощью которого настраивается сварочный ток $I_{дв}$ или ток горячего пуска $I_{гп}$). Штриховыми линиями изображены две крайние ватт-амперные характеристики P_2 и P_6 для сварки электродами диаметром соответственно 2 и 6 мм.

Каждый эксперимент начинался с короткой дуги при напряжении около 20 В и токе $I_{гп} = 1,5I_{дв}$, а после окончания горячего пуска продолжался на своем участке 4 с током $I_{дв}$. Потом по мере расплавления электрода траектория переходного процесса шла по линии 3 и переходила на линию 2. При этом непрерывно увеличивалась длина, а вместе с ней и напряжение дуги, пока оно не достигало напряжения источника $U_{и2}$ на участке 2. Вскоре после этого дуга самопроизвольно обрывалась.

Обобщенные по результатам нескольких аналогичных экспериментов траектории изменения тока и напряжения показаны тонкими линиями со стрелками. В начале этих линий указаны диаметры электродов от 2 до 6 мм. Кружки с указанием соответствующих диаметров электродов в конце этих линий отмечают параметры дуги в момент ее обрыва — напряжение $U_{об}$ и ток $I_{об}$. Как видно, в приведенном примере напряжение обрыва $U_{об} = 47\text{--}54\text{ В}$. Оно, как правило, соответствует напряжению источника на жестком участке 2 ($U_{об} = U_{н2}$) и мало зависит от типа электродного покрытия, марки и диаметра электрода, установленного тока, вероятно, также от пространственного положения шва и полярности дуги.

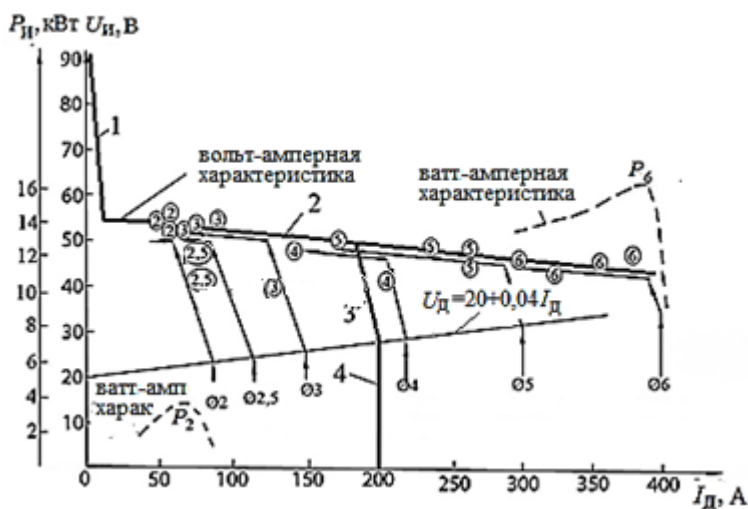


Рис. 4.15. Электрические характеристики выпрямителя ВДУ-506МТ при оценке эластичности дуги

Как следует из графиков $P_{и} = f(I_{д})$, для этого источника режим с максимумом полезной мощности соответствует точке пересечения участков 2 и 3 вольт-амперной характеристики, а напряжение согласованного режима равно напряжению источника на 2 участке — $U_{сог} = U_{н2}$.

Итак, в эксперименте с современным источником, имеющим комбинированную внешнюю характеристику, подтверждается правильность выбора напряжения обрыва $U_{об}$ в качестве непосредственного критерия, а напряжения согласованного режима $U_{сог}$ — в качестве косвенного критерия эластичности. Здесь также выявляется непригодность для этих целей тока обрыва $I_{об}$ по причине плохой по-

вторяемости и воспроизводимости. Так, на рис. 4.15 видно, что в четырех одинаковых экспериментах с электродом диаметром 6 мм получены значения $I_{об}$ от 300 до 370 А, тогда как $U_{об}$ варьируется в узком диапазоне 47–50 В. Между тем, в ранних исследованиях эластичности ток обрыва дуги $I_{об}$ предлагался в качестве непосредственного критерия эластичности как характерный атрибут конкретной марки и диаметра электрода.

4.4.4. Математическое описание процессов при удлинении дуги.

Напряжение согласованного режима для конвенционального источника с монотонно падающей внешней характеристикой определим с учетом зависимостей U_n и P_n от тока дуги I_d , а также от активного R_n и индуктивного X_n сопротивлений источника.

Вольт-амперная характеристика источника

$$U_n = \sqrt{U_x^2 - (I_d X_n)^2} - I_d R_n. \quad (4.15)$$

Ватт-амперная характеристика источника

$$P_n = [\sqrt{U_x^2 - (I_d X_n)^2} - I_d R_n] I_d. \quad (4.16)$$

Производная мощности по току

$$\frac{dP_n}{dI_d} = \frac{U_x^2 - 2(I_d X_n)^2 - 2I_d R_n \sqrt{U_x^2 - (I_d X_n)^2}}{\sqrt{U_x^2 - (I_d X_n)^2}}.$$

Максимум мощности достигается в согласованном режиме при $dP_n/dI_d = 0$, т.е. при

$$U_x^2 - 2(I_d X_n)^2 - 2I_d R_n \sqrt{U_x^2 - (I_d X_n)^2} = 0 \quad (4.17)$$

Это и есть условие согласования режима.

При совместном решении уравнений (4.15) и (4.17) получаем соотношение для определения напряжения согласованного режима

$$U_{\text{сog}} = U_x \sqrt{\frac{\sqrt{R_n^2 + X_n^2}}{2(R_n + \sqrt{R_n^2 + X_n^2})}} \quad (4.18)$$

Вместо громоздкого соотношения (4.18) воспользуемся уравнением

$$U_{\text{сog}} = k_{\text{сog}} U_x, \quad (4.19)$$

где $k_{\text{сог}}$ — коэффициент согласования режима нагрузки и источника

$$k_{\text{сог}} = \sqrt{\frac{\sqrt{R_{\text{и}}^2 + X_{\text{и}}^2}}{2(R_{\text{и}} + \sqrt{R_{\text{и}}^2 + X_{\text{и}}^2})}} = \sqrt{\frac{Z_{\text{и}}}{2(R_{\text{и}} + Z_{\text{и}})}}. \quad (4.20)$$

Рассмотрим примеры определения коэффициента согласования в зависимости от типа внешних вольт-амперных характеристик:

а) Если $X_{\text{и}} = 0$, то из (4.15) $U_{\text{и}} = U_{\text{x}} - I_{\text{д}}R_{\text{и}}$ — прямолинейно падающая характеристика (как у коллекторного генератора или поста с балластным реостатом). Тогда из (4.20) $k_{\text{сог}} = 0,5$.

б) Если $R_{\text{и}} = 0$, то $U_{\text{и}} = \sqrt{U_{\text{x}}^2 - (I_{\text{д}}X_{\text{и}})^2}$ — выпуклая падающая характеристика типа четверти эллипса (как у трансформатора с увеличенным рассеянием или у диодного выпрямителя с таким трансформатором). Тогда $k_{\text{сог}} = 0,7$.

в) Если $R_{\text{и}} \neq 0$ и $X_{\text{и}} \neq 0$, то $U_{\text{и}} = \sqrt{U_{\text{x}}^2 - (I_{\text{д}}X_{\text{и}})^2} - I_{\text{д}}R_{\text{и}}$ — выпуклая характеристика, имеющая форму, промежуточную между вариантами а) и б). Поэтому и $k_{\text{сог}} = 0,5\text{--}0,7$.

г) Если $R_{\text{и}} = 0$ и $X_{\text{и}} = 0$, то $U_{\text{и}} \equiv U_{\text{x}}$ — жесткая характеристика (как у трансформатора с нормальным рассеянием или у выпрямителя с таким трансформатором). Тогда $k_{\text{сог}} = 1$.

Напряжение согласованного режима для современного источника приходится на 2 (жесткий) участок его комбинированной характеристики. Тогда с учетом его небольшого наклона ($-0,07 \leq \rho_{\text{и}2} \leq 0$ В/А), можно использовать приблизительное соотношение

$$U_{\text{сог}} \approx U_{\text{x}2} + I_{\text{дур}2}.$$

Расчет разрывной длины дуги выполним с учетом того, что напряжение обрыва состоит из падения напряжения $U_{\text{ка}}$ в катодной и анодной областях дуги, а также из напряжения столба с градиентом потенциала $\varepsilon_{\text{ст}}$ и длиной столба, равной разрывной длине $l_{\text{др}}$:

$$U_{\text{об}} = U_{\text{ка}} + \varepsilon_{\text{ст}}l_{\text{др}}. \quad (4.21)$$

Тогда из (4.19) и (4.21) с учетом $U_{\text{сог}} = U_{\text{об}}$ получаем для конвенционального источника с падающей внешней характеристикой

$$l_{\text{др}} = (k_{\text{сог}}U_{\text{x}} - U_{\text{ка}})/\varepsilon_{\text{ст}}, \quad (4.22)$$

а для современного источника с комбинированной характеристикой

$$l_{\text{др}} \approx (U_{\text{x}2} + I_{\text{дур}2} - U_{\text{ка}})/\varepsilon_{\text{ст}}. \quad (4.23)$$

В табл. 4.4 приведены результаты расчета по этим уравнениям значений разрывной длины при разных типах электродных покрытий. В расчетах также учитывались соответствующие значения напряжения U_{x}

и наклона $\rho_{\text{и}}$ характеристики источников. Отметим удовлетворительное совпадение теоретических и экспериментальных значений $l_{\text{др}}$.

Таблица 4.4.

Расчетное и экспериментальное определение разрывной длины дуги

Тип, марка источника	Параметры источника	Электрод (диаметр, марка)	Расчет разрывной длины по формулам (4.22) и (4.23) $l_{\text{др}}$, мм	Эксперимент $l_{\text{др}}$, мм
Преобразователь ПСО-500	$U_{\text{x}} = 88 \text{ В}$ $R_{\text{и}} = 0,11 \text{ Ом}$ $k_{\text{сog}} = 0,5$	6 мм, ОЗС-4	$(0,5 \cdot 88 - 18)/1,5 = 17$	20
Трансформатор ТДМ-401	$U_{\text{x}} = 68 \text{ В}$ $X_{\text{и}} = 0,17 \text{ Ом}$ $k_{\text{сog}} = 0,7$	6 мм, ОЗС-4	$(0,7 \cdot 68 - 18)/1,5 = 23$	21
Тиристорный выпрямитель ВДУ-506МТ	$U_{\text{x2}} = 55 \text{ В}$ $\rho_{\text{и2}} = -0,02 \text{ В/А}$ $k_{\text{сog}} = 1$	2 мм, ОЗС-12	$(55 - 60 \cdot 0,02 - 16)/2 = 19$	21
		3 мм, УОНИ13/55	$(55 - 100 \cdot 0,02 - 20)/2 = 17$	14
		4 мм, УОНИ13/55	$(55 - 150 \cdot 0,02 - 20)/2 = 16$	16
		5 мм, ТМЛ-1У	$(55 - 200 \cdot 0,02 - 20)/2 = 15$	17
		6 мм, ОЗС-4	$(55 - 270 \cdot 0,02 - 18)/1,5 = 21$	22

4.4.5. Управление эластичностью дуги с помощью источника

Электротехнические приемы управления эластичностью дуги рассмотрим с использованием вышеприведенных уравнений. В большинстве случаев ручной сварки отношение $l_{\text{др}}/d_{\text{э}}$ должно находиться в пределах 2,5–3. При выполнении вертикальных и потолочных швов, а также при сварке в стесненных условиях, затрудняющих манипулирование электрододержателем, указанное отношение может быть превышено. Наоборот, в случае постановки прихваток, отношение $l_{\text{др}}/d_{\text{э}}$ можно уменьшить для ускорения обрыва дуги при переходе на новое место (специальная функция «broken arc» — прерывистая дуга).

Напряжение холостого хода кроме характеристики воздействия на эластичность может считаться и косвенным критерием для ее оценки, поскольку по величине U_{x} предварительно (до испытания) можно выяснить пригодность источника для сварки в конкретных технологических условиях. Для этого решим уравнение (4.22) относительно напряжения холостого хода:

$$U_{\text{x}} = (\epsilon_{\text{ст}} l_{\text{др}} + U_{\text{ка}})/k_{\text{сog}}. \quad (4.24)$$

Например, при использовании источника постоянного тока с выпуклой падающей характеристикой ($k_{\text{сog}} = 0,7$) и электродов диаметром

4 мм ($l_{\text{др}} = 3d_3 = 12$ мм) марки УОНИ 13/55 дугой обратной полярности ($U_{\text{ка}} = 20$ В, $\epsilon_{\text{ст}} = 2$ В/мм) получаем:

$$U_x = (2 \times 12 + 20) / 0,7 = 63 \text{ В.}$$

Диапазон известных значений напряжения холостого хода у типичных источников постоянного тока для ручной сварки 40–113 В. Предельно низкое напряжение 40 В назначается только при сварке электродами с рутиловым покрытием. Предельно высокое напряжение 113 В можно рекомендовать при сварке электродами с целлюлозным покрытием. В случае использования простейших нестабилизированных источников необходимо еще учитывать, что напряжение холостого хода у них пропорционально напряжению сети, допустимые колебания которого в сварочных цехах составляют 10 %. Подобная проблема возникает и при использовании генераторов, напряжение холостого хода которых связано со стабильностью частоты вращения приводного двигателя.

У современных источников с комбинированной внешней характеристикой эластичность независимо и точно задается настройкой напряжения холостого хода U_{x2} на жестком участке 2 (см. рис. 4.26). Для этого случая из (4.23)

$$U_{x2} \approx l_{\text{др}} \epsilon_{\text{ст}} + U_{\text{ка}} - I_{\text{ду}} \rho_{\text{и2}}.$$

С учетом типичных значений $\epsilon_{\text{ст}}$, $U_{\text{ка}}$ и $\rho_{\text{и2}}$ при сварке электродами с рутиловым покрытием для обеспечения $l_{\text{др}} = 3d_3$ напряжение холостого хода U_{x2} должно быть от 35 до 45 В, с основным покрытием — от 45 до 55 В, с целлюлозным покрытием — от 55 до 70 В.

В работе [55] методика расчета рабочего напряжения источника также мотивирована требованиями эластичности с учетом типичных значений $\epsilon_{\text{ст}}$ и $U_{\text{ка}}$. Недостаток методики в том, что расчет не доведен до вычисления необходимого значения напряжения холостого хода. А между тем, как показано выше, рабочее (нормированное) напряжение близко к напряжению холостого хода только у источников с комбинированной характеристикой, где $U_{\text{об}} \approx U_{x2}$. В общем же случае $U_{\text{об}}$, а поэтому и рабочее напряжение источника может составлять $(0,5-1)U_x$, что хорошо видно на осциллограмме напряжения в момент обрыва (см. рис. 1.7).

Тип и наклон внешней характеристики — менее распространенные косвенные критерии для оценки эластичности. Наилучший тип для обеспечения максимальной эластичности — комбинированная характеристика с жестким участком (рис. 4.26), который может иметь наклон от 0 до $-0,07$ В/А (при этом $U_{\text{об}} \approx U_{x2}$).

Благоприятным типом для достижения высокой эластичности является и выпуклая падающая характеристика. В точке обрыва дуги, т.е. при малых токах, такая характеристика имеет сравнительно пологий

наклон от $-1,3$ до $-0,07$ В/А (при этом $U_{06} = 0,7U_x$). Уже менее благоприятный тип среди распространенных источников — прямолинейно падающая характеристика ($U_{06} = 0,5U_x$). Продолжая этот ряд, можно сделать вывод, что наихудший тип — это вогнутая падающая характеристика. Естественным образом такие неблагоприятные в отношении эластичности характеристики получаются у инверторных источников. Поэтому у них внешние характеристики формируют только искусственно, как правило, с жестким участком.

4.4.6. Значительное удлинение дуги при разных способах сварки

Эластичность дуги при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом, как и в случае ручной сварки покрытым электродом, характеризуется разрывной длиной дуги. Методика эксперимента с использованием для этих целей штатива описана в разд. 3.2. Отличие от ручной сварки покрытым электродом заключается в очень больших значениях разрывной длины $l_{др}$ — от 17 до 50 и более мм для источника с подпиткой ($U_{x1} = 95$ В и $I_{x1} = 10\text{--}47$ А) (табл. 3.3). Это объясняется относительно низкими значениями $U_{ка} = 5\text{--}15$ В и $\varepsilon_{ст} = 0,7\text{--}1,0$ В/мм [8, 46] у дуги прямой полярности в аргоне, что в свою очередь связано с относительно низким потенциалом ионизации вольфрама и низкой теплопроводностью аргона. Основные закономерности в отношении эластичности, установленные при использовании покрытых электродов, подтверждаются и здесь: разрывная длина пропорционально увеличивается с ростом напряжения холостого хода источника, несколько увеличивается с увеличением тока подпитки, почти не зависит от диаметра электрода и установленного тока (за исключением крайних значений, когда плотность тока в электроде оказывается менее 1 А/мм²).

Устойчивость процесса механизированной и автоматической сварки плавящимся электродом при значительном удлинении дуги оценивают иначе. Дело в том, что в отличие от ручной сварки покрытым электродом медленные возмущения системы АРДС и АРНД_у отрабатывают с почти полным восстановлением длины дуги (см. разд. 4.3.2). Поэтому для практики имеет значение только способность автоматической системы отрабатывать значительные скачкообразные возмущения $\tilde{\Delta}l_d$. На рис. 4.16 приведены осциллограммы тока и напряжения при автоматической сварке под флюсом, полученные в эксперименте с «падающей планкой», т.е. с быстрым перемещением наплавляемого образца вниз на фиксированное расстояние $\tilde{\Delta}l_d = 8$ мм. В данном эксперименте максимальное значение длины дуги составило приблизительно 14 мм.

Предельное скачкообразное удлинение дуги $\Delta l_{д\max}$, отрабатываемое без обрыва при резком возмущении — непосредственный критерий устойчивости процесса механизированной и автоматической сварки. Для повышения устойчивости систем АРДС и АРНД_у при значительных скачках длины дуги

увеличивают напряжение холостого хода и снижают наклон характеристики источника, а также увеличивают индуктивность сварочной цепи.

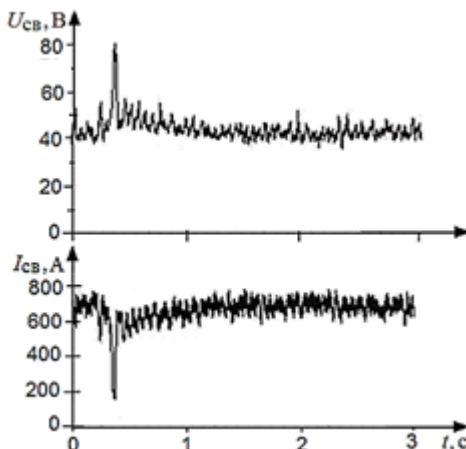


Рис. 4.16. Удлинение дуги методом «падающей планки» при автоматической сварке под флюсом (ВКСМ-1000-1 + 4 балластных реостата РБ-301, аппарат А-1416, проволока Св-08А Ø4 мм, флюс АН-348, 700 А, 43 В)

4.5 Устойчивость при механизированной сварке с технологическими короткими замыканиями

4.5.1. Электрические процессы при сварке короткой дугой

Короткая дуга при механизированной сварке в активных газах получается не с помощью манипуляций горелкой, а благодаря низкому напряжению источника. Например, при сварке в углекислом газе с напряжением $U_{и} < 25\text{--}30 \text{ В}$ самоустанавливается дуга длиной не более 5 мм. Короткая дуга обладает заметными технологическими преимуществами, что вынуждает мириться с серьезным недостатком такого процесса — частыми короткими замыканиями капли на ванну, которые принято называть естественными или технологическими.

Процесс сварки короткой дугой имеет периодический двухстадийный характер (рис. 4.17). На стадии дугового разряда (1) происходит плавление электрода и образование капли. Дуговая стадия продолжается в течение времени $t_{д} = 3\text{--}150 \text{ мс}$. По мере роста капли при непрерывной подаче электрода и встречном движении колеблющейся ванны длина дуги сокращается, а напряжение падает. Затем капля касается ванны,

при этом дуга гаснет, напряжение резко снижается до U_k , а ток возрастает до пикового значения $I_{кп}$ — идет стадия короткого замыкания. Ее длительность $t_{кк} = 1\text{--}20$ мс. В начале этой стадии (2) капля касается ванны на очень небольшой площади. Искривление линий тока, проходящих через узкую жидкую перемычку между каплей и ванной, вызывает появление электродинамических сил пинч-эффекта, сжимающих перемычку и препятствующих переходу капли в ванну. Но при благоприятном ходе переноса капля сливается с ванной и начинает перетекать в нее (3). Это приводит к образованию узкой перемычки уже между каплей и электродом. Окончательное разрушение перемычки происходит под действием электродинамических сил пинч-эффекта, а также благодаря перегреву и взрывному испарению металла перемычки в результате возрастания в ней плотности тока (4). После разрыва цепи короткого замыкания дуга возникает самопроизвольно с кратковременным всплеском напряжения повторного зажигания U_3 (5). Затем напряжение устанавливается на уровне U_d , а ток снижается до I_d . Описанные явления имеют периодический характер в виде многократных повторений микроциклов «дуга–короткое замыкание».

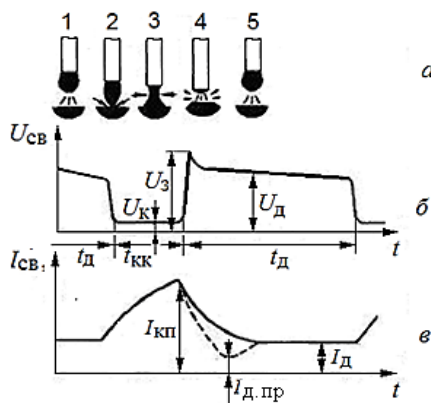


Рис. 4.17. Процесс сварки короткой дугой (а) и схематичные осциллограммы напряжения (б) и тока (в)

Рассмотрим особенности саморегулирования при сварке короткой дугой. Так, при скачкообразном возмущении по длине дуги $\Delta l_d < 0$ образование новой капли происходит в сократившемся межэлектродном промежутке, что приведет к уменьшению диаметра переносимой капли d_k и длительности стадии дугового разряда t_d , а также и длительности стадии короткого замыкания такой каплей $t_{кк}$. Следовательно, увеличится частота коротких замыканий $f_{кк}$, а поэтому и частота переносов ка-

пель f_k . Но мощность тепловыделения в электроде возросла, и следовательно, средняя за микроцикл скорость плавления электрода $V_{пл}$ превысила постоянную скорость подачи проволоки $V_{под}$. Поэтому за несколько следующих микроциклов длина дуги l_d увеличится и восстановится до исходного перед возмущением значения:

$$l_d \downarrow \Rightarrow t_d \downarrow \Rightarrow f_k \uparrow \Rightarrow V_{пл} \uparrow \Rightarrow l_d \uparrow.$$

Как видно, и в случае короткой дуги саморегулирование приводит к стабилизации параметров процесса в случае действия умеренных возмущений. Но такой процесс реализуется суммированием эффектов от нескольких стадий дуговых разрядов и коротких замыканий, и поэтому назван интегральным саморегулированием [8, 225].

При сварке короткой дугой, несмотря на резкие изменения параметров, обеспечивается практически равномерное плавление основного металла и образование сплошного ровного шва. Это позволяет говорить о *технологической устойчивости* процесса, не смешивая ее с классическим понятием устойчивости как длительной неизменности характера электрических процессов [56]. Условием технологической устойчивости процесса с частыми короткими замыканиями следует считать регулярную смену стадий дугового разряда и короткого замыкания. Характер переноса капли интересует нас еще и потому, что он влияет на ход физико-химических процессов и на разбрызгивание электродного металла за пределы сварочной ванны. Эта часть проблемы сварки с короткими замыканиями подробно проанализирована в разд. 8.

Рассмотрим пример нарушения технологической устойчивости процесса сварки короткой дугой, связанный с нерегулярным капельным переносом. В работе [228] по осциллограммам выявлен механизм потери устойчивости (рис. 4.18). При относительно низком напряжении источника настроенная скорость подачи проволоки превышает скорость ее плавления в дуговой стадии. Электрические процессы при этом приобретают несвойственный короткой дуге низкочастотный (2–5 Гц) периодический характер. В результате постепенного приближения электрода к ванне происходит длительное замыкание (продолжительностью в сотни миллисекунд) – вплоть до утыкания электрода в дно ванны. При этом вылет электрода перегревается током короткого замыкания и расплавляется с образованием довольно большого межэлектродного промежутка — наступает стадия холостого хода. В течение этой стадии проволока приближается к ванне, и происходит повторное зажигание дуги. Сначала дуга имеет большую длину, которая затем быстро укорачивается. Возобновляющиеся при короткой дуге технологические замыкания постепенно учащаются и затягиваются и, наконец, переходят в длительное замыкание. Далее описанные процессы периодически повторяются. Та-

кой процесс уже нельзя назвать устойчивым. Действительно, на этапе длительного замыкания равномерное поступление капель электродного металла в ванну прекращается, а в момент повторного зажигания ванна расплескивается газодинамическим ударом. При этом и электродный металл частично выбрасывается за пределы ванны. В результате шов становится неровным, плохо сплавляется с кромками свариваемых заготовок и имеет большое количество газовых и шлаковых включений.

Вероятность такой потери устойчивости сварочным процессом возрастает при уменьшении напряжения источника и при увеличении скорости подачи электрода, а также при увеличении наклона внешней характеристики источника. Такой процесс характерен не только для инверторного источника, как в случае, показанном на рис. 4.18, но и для других систем питания с низкой индуктивностью сварочной цепи. В случае же инверторного источника для предотвращения таких нарушений устойчивости необходим и возможен (благодаря высокому быстродействию) управляемый перенос мелкими каплями.

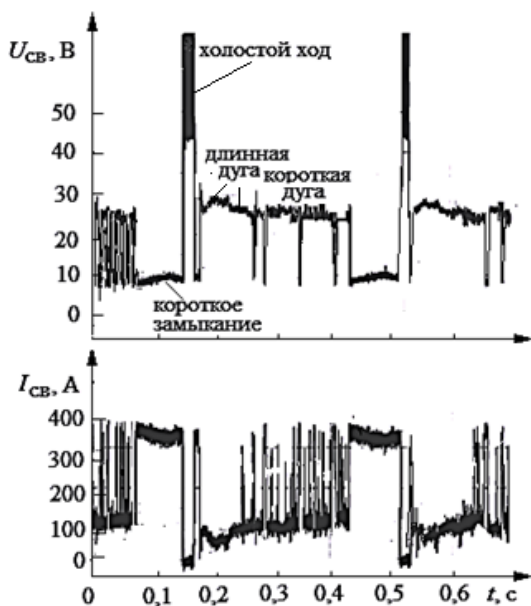


Рис. 4.18 Сварка с систематическими нарушениями дугового процесса (инверторный источник, $U_{x2} = 34 \text{ В}$, $\rho_u = -0,075 \text{ В/А}$, $V_{\text{под}} = 5 \text{ м/мин}$, $l_e = 12 \text{ мм}$, $L < 5 \text{ мкГн}$, проволока Св-08Г2С $\varnothing 1,2 \text{ мм}$, CO_2)

Условия технологической устойчивости процесса сварки короткой дугой исследованы в работе [239] (рис. 4.19). Здесь при варьирова-

нии напряжением холостого хода источника и скоростью привода подачи выявлены в координатах $U_{\text{и}}$ - $V_{\text{под}}$ границы областей сварки длинной дугой, короткой дугой, а также нарушения сварочного процесса. При высоких $U_{\text{и}}$ и низких $V_{\text{под}}$ идет сварка длинной дугой, т.е. без коротких замыканий. Положение верхней границы области сварки короткой дугой зависит от конкретного сочетания диаметра и вылета электродной проволоки. Верхние границы, показанные сплошными линиями, опускаются при уменьшении d_s и l_v . Нижние границы, одна из которых показана штриховой линией, отражают потерю устойчивости либо из-за затяжки интервалов коротких замыканий, как это видно на рис. 4.18, либо из-за утыкания электрода в дно сварочной ванны. Положение нижней границы (и общая ширина области сварки короткой дугой) зависит от большого количества факторов. Кроме вышеперечисленных ($U_{\text{и}}$, $V_{\text{под}}$, d_s и l_v) это – наклон характеристики источника $\rho_{\text{и}}$ и сопротивление внешней сварочной цепи $R_{\text{вн}}$. Так, при чрезмерно крутом наклоне ВАХ с $\rho_{\text{и}} < -0,07$ В/А перенос капли с коротким замыканием недопустимо затягивается, а область режимов сварки короткой дугой почти полностью исчезает. А увеличение $R_{\text{вн}}$ поднимает обе границы. Например, при большой длине сварочных проводов, когда $R_{\text{вн}}$ превышает 0,06 Ом, приходится поднимать $U_{\text{и}}$ выше 30 В.

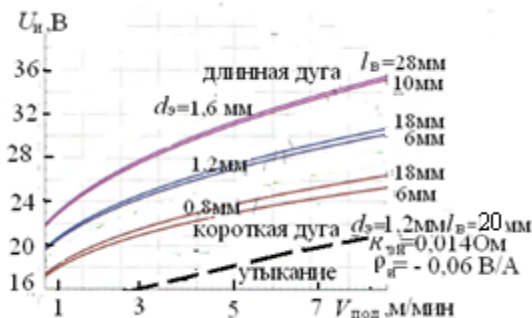


Рис. 4.19 Границы областей режимов сварки в углекислом газе (инверторный источник, $U_{x2} = 18-60$ В, $\rho_{\text{и}} = -0,021 \dots -0,075$ В/А, $L < 5$ мкГн, проволока Св-08Г2С)

4.5.2. Непосредственные критерии устойчивости при сварке короткой дугой.

В работе [38] проанализировано не менее 25 критериев, предложенных в технической литературе, на предмет адекватного отражения ими проблемы устойчивости с учетом регулярности коротких замыка-

ний. Для заявленной цели нами отобраны следующие параметры со статистическими характеристиками их стохастического вида (табл. 4.5):

- частота коротких замыканий каплями $f_{\text{кк}}$;
- длительность коротких замыканий каплями $t_{\text{кк}}$;
- длительность интервалов горения дуги $t_{\text{д}}$;
- пиковый ток коротких замыканий каплями $I_{\text{кп}}$.

Таблица 4.5.

Непосредственные критерии устойчивости процесса сварки в углекислом газе (выпрямитель ВС-420, подающий механизм Урал-3, проволока Св-08Г2С)

№ режима по ГОСТ 25616-83		1	2	8	10	17	19	–
Диаметр проволоки, мм		0,8		1,2		1,6		2,0
Настройки:								
напряжение источника $U_{\text{х}}$, В		21,3	22,5	27	29	37,5	44	45,4
скорость подачи $V_{\text{под}}$, м/мин		3,8	5,0	4,1	6,2	5,8	9,8	6,0
индуктивность дросселя $L_{\text{др}}$, мГн		0,2	0,2	0,38	0,35	0,4	0,4	0,66
Расход газа $Q_{\text{г}}$, л/мин		5	5	10	12	18	20	16
Режим:								
ток $I_{\text{св}}$, А		70	100	150	200	300	400	450
напряжение $U_{\text{св}}$, В		18	19	22	24	29	34	33
Частота коротких замыканий каплями	$f_{\text{кк.ср}} \pm \sigma$, Гц	123 ± 6	122 ± 20	46,4 $\pm 4,1$	33,7 $\pm 2,0$	14,6 $\pm 1,1$	7,4 –	–
	$k_{\text{в/кк}}$	0,05	0,16	0,09	0,06	0,14	–	–
Длительность коротких замыканий каплями	$t_{\text{кк.ср}} \pm \sigma$, мс	1,6 $\pm 0,2$	1,6 $\pm 0,4$	4,0 $\pm 1,0$	5,2 $\pm 1,1$	4,1 $\pm 1,1$	3,7 $\pm 1,7$	3,3 $\pm 1,8$
	$k_{\text{в/кк}}$	0,12	0,25	0,25	0,21	0,27	0,46	0,54
Длительность интервалов горения дуги	$t_{\text{д.ср}} \pm \sigma$, мс	5,6 $\pm 3,8$	5,5 $\pm 3,2$	20,6 $\pm 5,8$	22,8 $\pm 4,8$	43,9 $\pm 23,3$	37,6 $\pm 19,6$	58,5 $\pm 21,8$
	$k_{\text{в/д}}$	0,68	0,58	0,28	0,21	0,53	0,52	0,37
Пиковый ток коротких замыканий каплями	$I_{\text{кп.ср}} \pm \sigma$, А	150	160	270	360 ± 30	500		
	$k_{\text{в/кп}}$				0,08			
Скорость нарастания тока коротких замыканий каплями	$dI_{\text{к}}/dt$, кА/с	77	65	40	52	54	–	–

Наиболее употребительные статистические характеристики, например для пикового тока — это среднее значение $I_{\text{кп.ср}}$, среднеквадратическое отклонение $\sigma_{\text{кп}}$ и коэффициент вариации $k_{\text{в/кп}}$ (пояснения см. в разд. 6.2).

На рис. 4.20 приведены осциллограммы и гистограмма, полученные при сварке в углекислом газе. Используем их для числовой характеристики непосредственных критериев устойчивости.

Частота коротких замыканий $f_{\text{кк}}$ вместе с коэффициентом вариации $k_{\text{в/кк}}$ — наиболее выразительные непосредственные критерии устойчивости процесса сварки короткой дугой. Частота, определенная по рис. 4.20, а, — 33,6 Гц, а с учетом других записей этого же режима среднее значение (и среднеквадратическое отклонение) частоты составили 33,7 ($\pm 2,2$) Гц. Малое значение коэффициента вариации $k_{\text{в/кк}} = 2,2/33,7 = 0,07$ говорит о высокой регулярности переноса и, следовательно, о высокой технологической устойчивости процесса. По литературным данным, при механизированной сварке в углекислом газе проволоками диаметром от 0,5 до 2 мм зафиксированы частоты переноса $f_{\text{кк}}$ от 200 до 5 Гц. При устойчивых (по другим критериям) процессах коэффициент вариации частоты $k_{\text{в/кк}}$ составляет от 0,05 до 0,20 [8, 17, 53]. Основные закономерности изменении частоты отражены в разд. 8.2.

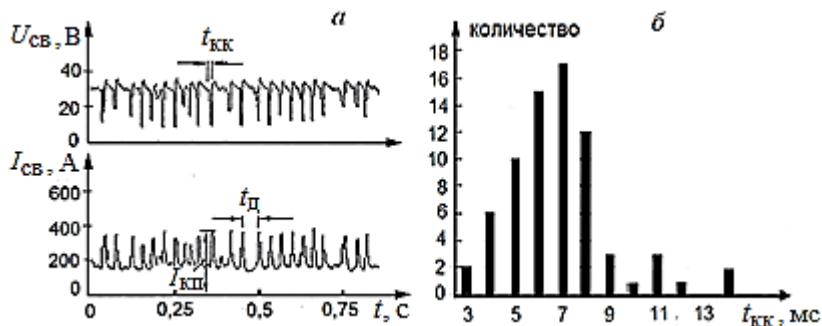


Рис. 4.20. Осциллограммы напряжения и тока (а), а также гистограмма длительности коротких замыканий каплями (б) при механизированной сварке (BC-420 + Урал-3, CO_2 Св-08Г2С $\varnothing 1,2$ мм, обратная полярность, 200 А, 24 В, дроссель 0,5 мГн)

Длительность коротких замыканий каплями электродного металла $t_{\text{кк}}$, определенная по гистограмме (рис. 4.20, б), составила 6,9 ($\pm 2,2$) мс. Длительность $t_{\text{кк}}$ в этом примере не должна превышать 14 мс (для более толстых проволок не более 20 мс), иначе при непрерывной подаче проволоки она чрезмерно приблизится или даже погрузится в ванну, что

затруднит последующее повторное зажигание дуги.

Умеренный разброс длительностей (коэффициент вариации $k_{v\text{кк}} = 0,32$) указывает на близкий размер капель, переносимых с короткими замыканиями. Нерегулярным мелко-крупнокапельным перенос становится, как известно, в «запретной» зоне режимов в диапазоне токов 200–350 А. При этом коэффициент вариации $k_{v\text{кк}}$ превышает 0,40.

Длительность горения дуги $t_{\text{д}}$, определенная по рис. 4.20, а, составила 22,9 ($\pm 4,8$) мс. Это менее выразительный и менее стабильный критерий, чем $f_{\text{кк}}$. Но в приведенном примере коэффициент вариации относительно невелик — $k_{v\text{д}} = 0,21$, и он дает представление о равномерности размеров капель. На этом же режиме нежелательна затяжка стадии дугового разряда $t_{\text{д}}$ более 200 мс, т.к. это приведет к чрезмерному росту капли, что может затруднить ее перенос в ванну. Абсолютно недопустимы длительные обрывы дуги, т.е. переход к стадии холостого хода источника.

Пиковый ток короткого замыкания каплей $I_{\text{кп}}$, определенный по рис. 4.20, а, составил 320 (± 30) А. Он превышает ток дуги в 2,1 раза, и выше среднего сварочного в 1,6 раза. Таким образом, пиковый ток может служить характеристикой энергичности переноса. С его увеличением перенос ускоряется, а устойчивость повышается. Энергичность электрических процессов, влияющих на темп переноса, может также характеризоваться скоростью нарастания тока коротких замыканий каплями $dI_{\text{к}}/dt$. В данном эксперименте она составила 45 кА/с.

В работе [38] также отвергаются в качестве критериев устойчивости средние значения сварочных тока и напряжения, поскольку усреднение параметров столь различных по физической природе процессов, как дуговой разряд и короткое замыкание каплей, только искажает их реальное влияние на устойчивость.

По этой же причине не эффективны в качестве критериев устойчивости и статистические характеристики названных величин. Например, при увеличении длительности коротких замыканий $t_{\text{кк}}$ в 2 раза (что должно бы вызвать опасения в отношении устойчивости процесса) коэффициент вариации сварочного напряжения $k_{vU_{\text{св}}}$ на разных режимах увеличивается всего на 0,07–0,10, а коэффициент вариации сварочного тока $k_{vI_{\text{св}}}$ может вообще не измениться (что не поддерживает эти опасения). Между тем, указанные критерии предлагаются многими авторами, хотя они не могут характеризовать не только технологическую устойчивость, но даже и стабильность параметров с целью стабилизации размеров шва (разд. 6.4).

Пример оценки устойчивости процесса при сварке в углекислом газе, в том числе на режимах, рекомендованных стандартом ГОСТ 25616-83, отражен в табл. 4.5. Два последних режима (№ 19 и без номера) соответ-

ствуют сварке длинной дугой и не должны оцениваться по выше приведенным критериям. Остальные режимы почти по всем критериям характеризуются малым разбросом значений — коэффициент вариации частоты коротких замыканий $k_{v\text{фкк}}$ не превышает 0,16, а длительности коротких замыканий $k_{v\text{ткк}}$ — не более 0,27. При такой высокой регулярности коротких замыканий процесс можно считать устойчивым на всех испытанных режимах сварки короткой дугой.

4.5.3. Косвенные критерии устойчивости процесса сварки короткой дугой.

Математическое описание электрических процессов при сварке короткой дугой, показанных на рис. 4.17, должно учитывать баланс энергии в источнике, дросселе, внешней сварочной цепи и дуге на обеих стадиях процесса.

На стадии короткого замыкания капель упрощенное уравнение для тока имеет вид

$$I_{\text{к}} = \frac{U_{\text{х}}}{R_{\text{и}} + R_{\text{вн}}} \left(1 - e^{-\frac{R_{\text{и}} + R_{\text{вн}}}{L} t} \right) \quad (4.25)$$

Приведенная зависимость отображает рост тока короткого замыкания капель в течение интервала $t_{\text{кк}}$, соответствующий рис. 4.17, в. При выводе уравнения не учтены параметры дуги к началу короткого замыкания, а также его длительность.

Из уравнения (4.25) следует, что амплитудное значение тока короткого замыкания

$$I_{\text{ку}} = \frac{U_{\text{х}}}{R_{\text{и}} + R_{\text{вн}}}. \quad (4.26)$$

а скорость нарастания тока короткого замыкания

$$dI_{\text{к}} / dt = \frac{U_{\text{х}}}{L} e^{-\frac{R_{\text{и}} + R_{\text{вн}}}{L} t}. \quad (4.27)$$

На стадии установления дуги после короткого замыкания капель уравнение для тока в зависимости от начальной длины межэлектродного промежутка $l_{\text{дн}}$ после разрыва перемычки имеет вид:

$$I_{\text{д}} = \frac{(U_{\text{х}} - U_{\text{ка}} - \varepsilon_{\text{ст}} l_{\text{дн}})}{R_{\text{и}} + R_{\text{вн}}} + \frac{U_{\text{ка}} + \varepsilon_{\text{ст}} l_{\text{дн}}}{R_{\text{и}} + R_{\text{вн}}} e^{-\frac{R_{\text{и}} + R_{\text{вн}}}{L} t}. \quad (4.28)$$

Это уравнение отображает спад тока дуги до $I_{\text{ду}}$ в интервале $t_{\text{д}}$, также представленный на рис. 4.17, в. Уравнение не учитывает конкретное значение начального тока $I_{\text{кп}}$, а также изменение $l_{\text{д}}$ на стадии дугового разряда, но может использоваться для качественной оценки процесса установления дуги после короткого замыкания капель.

Более точно математическое описание переноса капли выполнено в работах [8, 207]. В них устранены допущенные нами в уравнениях (4.25) и (4.28) упрощения, и дополнительно рассмотрены условия разрыва жидкой перемычки между электродом и каплей с учетом сил, действующих на каплю.

Приемы повышения технологической устойчивости для конвенциональных источников рассмотрим с помощью рис. 4.17. Поскольку большинство из нижеприведенных приемов воздействует на перенос электродного металла, то более подробно эти приемы охарактеризованы в разд. 8. Здесь же они будут только кратко описаны с позиций обеспечения устойчивости в трех критических моментах.

1) Критическим для обеспечения непрерывности процесса является момент начала короткого замыкания (поз. 2 на рис. 4.17, *а*). При слишком большом токе капля не сливается с ванной, а движется вверх и иногда даже отбрасывается за ее пределы. Например, сварка в углекислом газе проволокой диаметром 2 мм с короткими замыканиями не рекомендуется при токе 300–350 А именно по этой причине в связи с многократными задержками в переносе капли и с чрезмерным разбрызгиванием.

2) Еще один критический момент приходится на окончание стадии короткого замыкания (3). Для надежного прерывания короткого замыкания необходимо интенсивное разрушение перемычки между каплей и электродом, что обеспечивается при достаточно большом значении тока короткого замыкания [8]. Так, при сварке на токах от 50 до 300 А проволоками диаметром 0,5–1,4 мм необходим ток с пиковым значением $I_{\text{кп}} = 150\text{--}500$ А. Принято также оценивать надежность прерывания короткого замыкания по скорости нарастания тока короткого замыкания $dI_{\text{к}}/dt$, она для тех же проволок должна быть выше 40 кА/с [53]. При меньших значениях тока и скорости перемычка между каплей и электродом не разрушается, и стадия короткого замыкания затягивается, что приводит к погружению электрода в ванну. После этого дуга может не возобновиться, в результате непрерывность процесса нарушится. Однако и чрезмерно завышать ток короткого замыкания и его скорость не рекомендуется из-за повышенного разбрызгивания электродного металла.

Способы воздействия на ток короткого замыкания оценим с помощью уравнений (4.25–4.27). В типичном переходном процессе пиковый ток короткого замыкания $I_{\text{кп}}$ не достигает установившегося значения $I_{\text{кв}}$, поскольку перемычка разрушается раньше. Тем не менее, ясно, что приемы, направленные на увеличение $I_{\text{кв}}$, способствуют ускорению переноса капли. С этой целью по (4.26) следует:

— увеличивать напряжение холостого хода $U_{\text{х}}$ источника,

— снижать его внутреннее сопротивление $R_{\text{в}}$.

Для увеличения скорости нарастания тока короткого замыкания из (4.27) дополнительно необходимо:

— снижать индуктивность L .

Эти приемы, решая проблему надежного разрыва цепи короткого замыкания (поз. 3), обеспечивают выполнение главного условия технологической устойчивости. Но эти же приемы затрудняют слияние капли с ванной (2), играющее хоть и второстепенную, но заметную роль в обеспечении устойчивого процесса.

3) Последний критический момент (4) по рис. 4.17 связан с необходимостью повторного зажигания дуги после короткого замыкания. В некоторых случаях в кривой тока $I_{\text{д}}$ наблюдается провал до $I_{\text{д.пр}}$ (показано на рис. 4.17, в. штриховой линией), что в сочетании с другими неблагоприятными факторами (затянувшееся короткое замыкание, большой вылет электрода и т.д.) может привести к обрыву дуги. Во всяком случае, надежному установлению дугового процесса способствует медленный спад тока после разрыва цепи короткого замыкания. Как следует из анализа уравнения (4.28) с этой целью необходимо:

— повышать напряжение холостого хода источника,

— снижать его внутреннее сопротивление,

— увеличивать индуктивность сварочной цепи.

Вышеназванные приемы неоднозначно решают проблему устойчивости в трех указанных критических моментах. Поэтому в конвенциональных источниках значения названных электрических характеристик — $U_{\text{х}}$, $R_{\text{в}}$, $L_{\text{др}}$ — принимают на основе компромисса между отдельными требованиями, не обеспечивая максимального удовлетворения каждого из этих требований. В современных же источниках с обратными связями и высокоскоростным программным управлением возможно полное удовлетворение всех требований на основе управляемого переноса электродного металла (см. разд. 8.4).

Кратко охарактеризуем электрические параметры и специальные функции, способствующие обеспечению устойчивого процесса сварки короткой дугой.

Напряжение холостого хода $U_{\text{х}}$ — косвенный критерий устойчивости, с помощью которого можно оценить пригодность источника для механизированной сварки короткой дугой. Диапазон известных значений напряжения холостого хода для этих целей у конвенциональных источников — 15–30 В. Предельно низкое напряжение 15 В ограничивается из-за опасности утыкания электрода в изделие (см. рис. 4.18). Предельно высокое напряжение 30 В обеспечивает высокую устойчивость на стадии дугового разряда и уверенный перенос капли на стадии короткого замыкания. Но при высоком $U_{\text{х}}$ утрачиваются некоторые тех-

нологические достоинства короткой дуги — она переходит в длинную. У современных источников с обратными связями, имеющих комбинированную внешнюю характеристику, такие же значения U_{x2} относятся к основному жесткому участку 2 (см. рис. 4.28). У большинства источников для механизированной сварки напряжение холостого хода превышает 30 В и может достигать 60 В, но такие значения U_x используются при сварке длинной дугой на больших токах.

Наклон внешней характеристики $\rho_{\text{и}}$ (или внутреннее сопротивление $R_{\text{и}}$ конвенционального источника с прямолинейно падающей характеристикой) — косвенный критерий устойчивости, значения которого, как показано в разд. 4.3, принимаются по требованиям обеспечения асимптотической устойчивости и высокого быстродействия системы АРДС. Эти значения — от $-0,07$ до $+0,1$ В/А — в основном соответствуют и вышеизложенным требованиям устойчивости этой разновидности технологического процесса — сварки короткой дугой, поскольку обеспечивают высокий ток короткого замыкания и высокую скорость его нарастания при капельном переносе.

Индуктивность дросселя $L_{\text{др}}$ в сварочной цепи выпрямителя обычно принимают по соображениям снижения разбрызгивания в интервале $0,1\text{--}1$ мГн. Но правильнее проектировать дроссель на основе компромисса между требованиями снижения разбрызгивания и повышения технологической устойчивости. В этом отношении эффективен управляемый дроссель [24]. В начале короткого замыкания каплей он имеет большую индуктивность и, следовательно, сильно ограничивает ток, что способствует слиянию капли с ванной. А в конце короткого замыкания его индуктивность резко снижают, и ток круто нарастает, что обеспечивает сбрасывание капли с электрода.

Безразмерный критерий подобия $\pi_{\text{уст}}$ — показатель, согласующий между собой значения энергетических характеристик $V_{\text{под}}$, U_x и $L_{\text{др}}$ для обеспечения стабильной длительности $t_{\text{кк}}$, а поэтому и устойчивости. Такой подход сформулирован в работе [57] с помощью теории подобия методом анализа размерностей вышеприведенных характеристик оборудования:

$$\pi_{\text{уст}} = \frac{V_{\text{под}}}{U_x} \cdot \sqrt{L_{\text{др}} \sigma_{\text{пн}}},$$

где $\sigma_{\text{пн}}$ — коэффициент поверхностного натяжения металла капли (для стальной сварочной проволоки может быть принят $\sigma_{\text{пн}} = 1,2$ Н/м).

Критерий обладает свойством инвариантности, т.е. его оптимальное значение сохраняется относительно постоянным при варьировании числовых значений названных характеристик, а также и некоторых других, например, диаметра электрода. Это оптимальное значение $\pi_{\text{уст}} = 3$ при размерностях $V_{\text{под}}$ [м/мин], U_x [В], $L_{\text{др}}$ [мкГн] и $\sigma_{\text{пн}}$ [Н/м]. При $\pi_{\text{уст}} < 2$ экс-

периментально обнаруживаются обрывы дуги. При $\pi_{уст} > 4$ и соответствующей затяжке короткого замыкания возможна потеря устойчивости из-за утыкания проволоки в изделие. Безразмерный критерий не учитывает всех сложностей протекания электрических процессов на отдельных стадиях переноса, и поэтому годится только для предварительной оценки устойчивости. Достоинство этого критерия — в его комплексном характере, позволяющем назначать рациональное соотношение значений $V_{под}$, U_x и $L_{др}$.

Низковольтная подпитка — специальная функция для повышения технологической устойчивости за счет интенсификации переноса в заключительном интервале короткого замыкания капель [58]. С этой целью используется мощный вспомогательный выпрямитель ($U_x = 10\text{--}15\text{ В}$, $I_k = 100\text{--}300\text{ А}$), подключенный параллельно основному источнику. На стадии дугового разряда он заперт более высоким напряжением основного источника. А на стадии короткого замыкания подпитка вступает в работу, добавляя в нагрузку энергию для ускорения переноса капли и разрыва цепи короткого замыкания.

В работе [59] показано, что при использовании тиристорного выпрямителя с низковольтной подпиткой (15 В, 150 А) устойчивый процесс обеспечивается даже при аномально низком сварочном напряжении 14 В.

Высоковольтная подпитка — специальная функция, способствующая установлению дугового разряда после окончания короткого замыкания капель. Для этой цели используется маломощный вспомогательный выпрямитель ($U_x = 60\text{--}113\text{ В}$, $I_k = 10\text{--}50\text{ А}$), питающий дугу параллельно основному источнику, но вступающий в действие только на интервалах провалов напряжения основного источника. В работе [60] показано, что при использовании однофазного выпрямителя с высоковольтной подпиткой в виде умножителя напряжения (90–100 В, 1–10 А) минимально возможный сварочный ток $I_{свmin}$ на проволоках диаметром 0,8–1,2 мм удастся снизить до 12–18 А (при скорости подачи 0,6–1 м/мин).

4.6. Устойчивость при ручной сварке с технологическими короткими замыканиями

4.6.1. Непосредственные критерии устойчивости ручной сварки с короткими замыканиями

Такой процесс встречается при использовании электродов с основным или целлюлозным покрытием, для которых характерен крупнокапельный перенос, а поэтому возможно и переключение межэлектродного промежутка капель. Непосредственные критерии устойчивости этого

процесса на стадии дугового разряда такие же, как и в чисто дуговом процессе (частота обрывов, минимально возможный ток и разрывная длина дуги – см. разд. 4.2.1). Поэтому подробно рассмотрим только критерии, относящиеся к стадии короткого замыкания:

- длительность коротких замыканий каплями $t_{\text{кк}}$,
- пиковый ток коротких замыканий каплями $I_{\text{кп}}$,
- ток дуги в провалах после коротких замыканий $I_{\text{д.пр}}$.

На рис. 4.21 приведены осциллограммы при устойчивом процессе с короткими замыканиями, которые следуют регулярно и быстро переходят к дуговому разряду. Характеристики процесса (средние значения) на рис. 4.21: $t_{\text{д}} = 154$ мс, $t_{\text{кк}} = 7,3$ мс, $f_{\text{кк}} = 6,2$ Гц, $I_{\text{кп}} = 170$ А, $I_{\text{д.пр}} = 80$ А.

Длительность коротких замыканий каплями $t_{\text{кк}}$ — наиболее репрезентативный критерий устойчивости процесса с частыми короткими замыканиями, как показано в монографии [9]. Его значения ограничивают сверху, поскольку затяжка короткого замыкания приводит к чрезмерному охлаждению жидкой перемычки между электродом и сварочной ванной и даже к «прилипанию» электрода. Проблема устойчивости обостряется при сварке в пространственных положениях, отличных от нижнего (вертикальном, потолочном и др.), где действие силы тяжести на каплю затрудняет ее перенос.

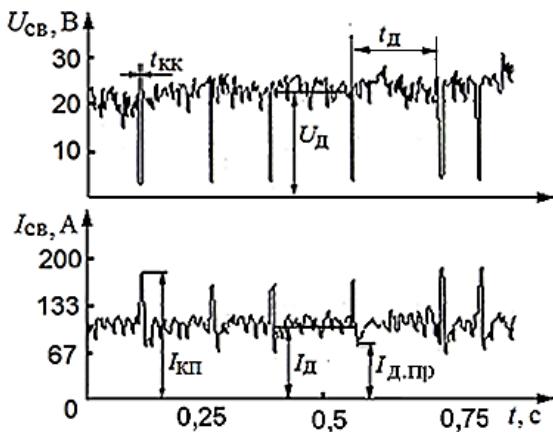


Рис. 4.21. Ручная сварка с технологическими короткими замыканиями (выпрямитель ВДУ-506МТ, УОНИ 13/55 Ø3 мм, $I_{\text{св}} = 100$ А, $U_{\text{св}} = 22$ В)

Экспериментально ограничение максимального значения $t_{\text{кк}}$ обосновано в работе [41] (см. рис. 9.7). Длительность $t_{\text{кк}}$ увеличивается с ростом диаметра электрода и снижением тока и, видимо, близка для любых марок стальных электродов с крупнокапельным переносом. Допустимое значение $t_{\text{кк}}$ соответствует упрощенному выражению $t_{\text{кк}} [\text{мс}] \leq 3d, [\text{мм}]$.

Пиковый ток короткого замыкания $I_{\text{кп}}$ — по физическому смыслу более мотивированный критерий. Дело в том, что именно от его значения зависят силовое и тепловое воздействия на жидкую переемычку, способствующие завершению короткого замыкания каплей. Минимально допустимое для предотвращения прилипания значение $I_{\text{кп}}$ увеличивается с ростом диаметра электрода и может быть получено из тех же экспериментальных данных работы [41]. Если принять типичную для конвенциональных источников связь пикового тока с установившимся сварочным $I_{\text{кп}} = 1,3I_{\text{сву}}$, то по данным рис.9.7 должен быть $I_{\text{кп}} > 70 (d_3 - 1)$.

Ток в провалах $I_{\text{д.пр}}$ после коротких замыканий каплями — менее распространенный критерий устойчивости, поскольку стадия дугового разряда в таком процессе не считается проблемной. Для электродов диаметром 2-4 мм достаточен ток в провалах соответственно 5–10 А.

4.6.2. Косвенные критерии устойчивости ручной сварки с короткими замыканиями

Косвенные критерии устойчивости такого процесса — это электрические характеристики источника, воздействуя на которые предотвращают прилипание электрода к ванне и обеспечивают надежное повторное зажигание дуги после коротких замыканий каплями. К ним относятся:

- напряжение холостого хода источника U_x ;
- ток короткого замыкания источника $I_{\text{кз}}$;
- ток форсирования дуги $I_{\text{ф}}$;
- параметры устройств для снижения провалов тока.

Принципы их выбора и настройки близки к описанным выше для механизированной сварки короткой дугой, поэтому ограничимся только кратким их пояснением.

Напряжение холостого хода назначается из того же диапазона 40–113 В, который ранее предлагался для ручной сварки с учетом только надежного начального зажигания и обеспечения устойчивости процесса без коротких замыканий. Увеличение U_x при сварке с технологическими короткими замыканиями повышает скорость установления дуги после короткого замыкания каплей, но обычно даже $U_x = 40$ В достаточно для надежного повторного зажигания.

Ток короткого замыкания источника (его установившееся значение) $I_{\text{кз}}$ у конвенционального источника для ручной сварки, как правило, значительно выше настроенного сварочного — $I_{\text{кз}} = (1,1-2)I_{\text{сву}}$. Пиковый ток короткого замыкания каплей $I_{\text{кп}}$ близок к установившемуся $I_{\text{кз}}$. Поэтому необходимое значение тока $I_{\text{кп}}$ получают настройкой сопротивления Z_n или напряжения U_x , поскольку $I_{\text{кп}} \approx I_{\text{кз}} = U_x / Z_n$. К сожалению, при такой настройке $I_{\text{кз}}$ изменится и ранее уже настроенный сварочный

ток $I_{сву}$, определяемый теми же параметрами источника U_x и $Z_{и..}$. Поэтому настройка режима в конвенциональном источнике выполняется на основе компромисса между требованиями к $I_{кп}$ и к $I_{св}$, и, следовательно, неоптимальная. Итак, в конвенциональном источнике невозможна независимая настройка $I_{ку}$ и $I_{сву}$. Но в современных источниках со вспомогательными силовыми цепями и быстродействующими МП-системами управления это вполне достижимо (разд. 9.4).

Ток форсирования I_{ϕ} — характеристика специальной функции «форсирование дуги» (*arcforcing*), заключающейся в кратковременном увеличении тока короткого замыкания. Благодаря форсированию сокращается длительность коротких замыканий каплями и снижается вероятность прилипания, а в результате повышается устойчивость процесса. Ток форсирования назначается в интервале $I_{\phi} = (1-2)I_{св.норм}$ и настраивается отдельно и независимо от сварочного тока.

Рассмотрим три варианта работы источника при разных значениях заданного тока форсирования, настроенного отдельным регулятором тока короткого замыкания — $I_{\phi} = (1; 1,5 \text{ и } 2)I_{св.норм}$ (рис. 4.22).

При увеличении в этом интервале тока форсирования длительность короткого замыкания каплями $t_{кк}$ естественным образом снижается от 14–19 мс к 8–10 мс и, наконец, до 4–6 мс. Поскольку склонность к прилипанию у используемых в эксперименте электродов УОНИ 13/55 диаметром 4 мм проявляется при $t_{кк} > 12$ мс, в данных условиях следует настраивать ток форсирования по соотношению $I_{\phi} = (1,2-1,3)I_{св.норм}$. Более высокий ток форсирования $I_{\phi} = (1,4-1,6)I_{св.норм}$ востребован только при сварке в вертикальном и потолочном положениях, и особенно при использовании электродов с целлюлозным покрытием. При сварке же электродами с рутиловым покрытием форсирование, как правило, не нужно.

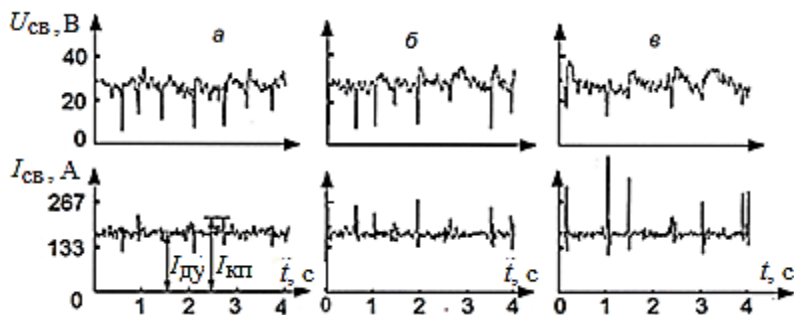


Рис. 4.22. Форсирование дуги в зависимости от настройки регулятора тока короткого замыкания $I_{\phi}/I_{св.норм}$: 1 (а), 1,5 (б), 2 (в) (генератор ГДУ-4001,

электрод УОНИ 13/55 Ø4 мм, 150 А, 26 В, нижнее положение)

Вспомогательные устройства для обеспечения надежного повторного зажигания дуги устраняют провал тока после короткого замыкания каплями, точнее, увеличивают ток в провале $I_{д.пр}$. К ним относят источник высоковольтной подпитки и пассивный стабилизатор дуги.

Высоковольтная подпитка — специальная функция, обеспечиваемая, как и при механизированной сварке, маломощным вспомогательным выпрямителем. С последним она имеет близкие параметры — $U_x = 80\text{--}113\text{ В}$, $I_k = 5\text{--}30\text{ А}$ — и так же вступает в действие только в интервалах провалов тока у основного источника. Например, при совместном действии подпитки и основного источника ВДУ-506МТ ток в провале поддерживается выше 60 А (см. рис. 4.21).

Пассивный стабилизатор горения дуги имеет в своем составе мощный конденсатор, включенный параллельно дуге [50]. Он заряжается от основного источника на стадии дугового процесса, а разряжается с начала короткого замыкания капель и сразу после появления дуги, ликвидируя провал тока (рис. 4.23). Такая специальная функция *Arc Plus*, реализованная в инверторных источниках фирмы *ESAB*, обеспечивает ток $I_{д.пр}$ не менее 50 А.

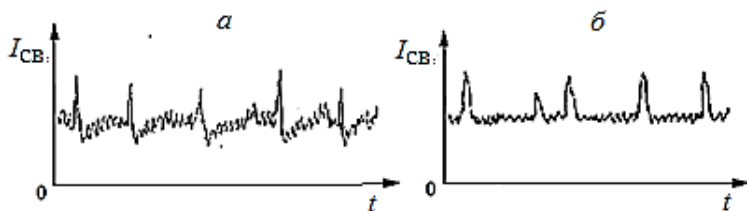


Рис. 4.23. Ручная сварка электродами основного типа без функции *Arc Plus* (а) и с ней (б) (инверторный источник *Caddy Arc 150*)

4.6.3. Формирование комбинированной внешней характеристики

Комбинированная характеристика источника для ручной сварки с короткими замыканиями показана на рис. 4.24. Такой источник, как правило, имеет в своем составе тиристорный выпрямительный блок или транзисторный инвертор с автоматическим регулятором. Следуя логике работы [61], он должен обеспечивать устойчивый процесс на стадии дугового разряда (на основном участке 3) и неустойчивый процесс развития и прерывания на стадии короткого замыкания капель (участок форсирования 4). Рассмотрим требования к положению и наклону 3 и 4 участков.

Для стадии дугового разряда параметры 3 участка примем с учетом требований обеспечения принципиальной устойчивости и эластичности дуги, а также настройки и стабилизации тока. Пусть точка настроенного

режима для сварки электродом УОНИ 13/55 диаметром 3 мм имеет координаты 100 А и 24 В. Зона режимов с допустимыми отклонениями тока $\pm 10\%$ имеет границы 90 и 110 А. Снизу зона ограничена напряжением при предельно короткой дуге $U_d \approx U_{ка} = 20$ В. Сверху при разрывной длине дуги $l_{др} = 3d_э = 9$ мм зона ограничена напряжением $U_d = U_{об} = 38$ В. Для обеспечения максимального запаса устойчивости ($k_y = \rho_d - \rho_n \gg 0$) участок 3 должен быть вертикальным или крутопадающим. Таким образом, для заданного режима 3 участок внешней характеристики должен проходить через точку В с координатами 100 А, 24 В с наклоном ρ_n от $-1,5$ до $-\infty$ В/А, полученным графическими построениями.

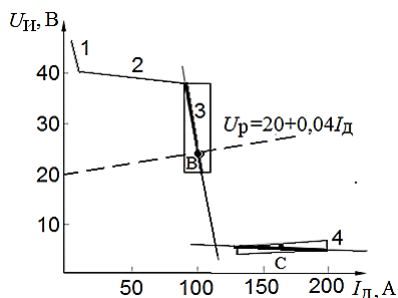


Рис. 4.24. Формирование комбинированной внешней характеристики источника для ручной сварки (электрод $\varnothing 3$ мм, основное покрытие, $I_{св} = 100$ А, $I_{кл} = 165$ А)

Для стадии короткого замыкания каплей теория развита недостаточно, хотя известно требование к ее длительности $t_{кк}$. Поэтому для выделения зоны 4 участка ограничимся переносом на рис. 4.24 экспериментальных значений $I_{кл}$ и U_k с осциллограмм разных источников для случаев, где длительность короткого замыкания $t_{кк} \leq 9$ мс, что гарантирует отсутствие прилипания. Экспериментальные данные укладываются в зоне с границами 130–200 А и 3–7 В. Поэтому 4 участок должен проходить через точку С (165 А, 5 В) с наклоном от $-0,015$ до 0 В/А. Если для формирования 4 участка используется низковольтная подпитка, то ее вспомогательный источник может иметь внешнюю характеристику $U_4 = 7 - 0,012I_{св}$, как и показано на графике.

4.7. Внешние характеристики источников с позиций обеспечения устойчивости

4.7.1. Ручная сварка покрытым электродом

Типичная внешняя вольт-амперная характеристика конвенционального (традиционного) источника постоянного тока — падающая с напряжением холостого хода от 40 до 113 В амплитудного значения и наклоном в диапазоне рабочих режимов от -3 до $-0,07$ В/А (рис. 4.25). Выпуклая (крутопадающая, по старой терминологии) характеристика формируется трансформатором с увеличенным рассеянием в составе диодного выпрямителя или индукторным генератором переменного тока в составе вентильного генератора. В обоих случаях внутреннее сопротивление источника $Z_{\text{и}}$ относительно велико — от 0,05 до 2 Ом, причем преобладает в нем индуктивная составляющая $X_{\text{и}}$. Реже используемая менее выпуклая (пологопадающая) характеристика формируется коллекторным генератором. А прямолинейно падающая характеристика получается при использовании балластного реостата в составе многопостовой системы питания. В обоих последних случаях в сопротивлении источника преобладает активная часть $R_{\text{и}}$. Во всех названных источниках настройка режима (сварочного тока) выполняется изменением напряжения или сопротивления источника. При проектировании источника необходимо обеспечить по возможности широкую область (зону) устойчивых режимов.

Границы зоны устойчивых режимов при ручной сварке покажем на примере источника с выпуклой падающей характеристикой, настраиваемого изменением напряжения холостого хода (рис. 4.25). Зона может сужаться под действием технологических и энергетических возмущений. Учтем из них по одному типичному — по длине дуги и по напряжению сети.

Нижняя граница зоны устойчивых режимов, где $U_{\text{дmin}} \approx U_{\text{ка}}$, соответствует предельно короткой дуге ($I_{\text{д}} \approx 0$). Сумма катодного и анодного падений напряжения $U_{\text{ка}}$ для известных покрытых электродов составляет от 15 до 28 В. Верхняя граница соответствует разрывной длине дуги ($I_{\text{д}} \approx I_{\text{др}}$), причем напряжение обрыва дуги, как показано в разд. 4.4, определяется напряжением холостого хода и наклоном внешней характеристики источника (4.18). Для принятого примера с U_{x} от 40 до 113 В при выпуклой внешней характеристике напряжение обрыва $U_{\text{об}} = (0,6-0,7)U_{\text{x}}$, т.е. может составлять от 24 до 79 В. Левая граница для нестабилизированного источника с учетом колебаний напряжения сети $\pm 10\%$ и минимально допустимого напряжения холостого хода 40 В соответствует внешним характеристикам с U_{x} от 40 до 49 В. Правая граница по тем же соображениям соответствует внешним характеристикам с U_{x} от 91 до 113 В.

Во внутренней (незаштрихованной) зоне дуговой процесс устойчив при использовании любых электродов и режимов сварки. Характеристика условной рабочей нагрузки, используемая при конструировании и настройке источников и по ГОСТ 60974-1-2012 соответствующая урав-

нению $U_p = 20 + 0,04I_d$, практически полностью находится внутри этой зоны абсолютной устойчивости. В заштрихованных зонах устойчивость обеспечивается только при выполнении дополнительных условий в отношении марки электрода (значения $U_{ка}$) и стабильности сетевого напряжения. За пределами этих участков дуговой процесс неосуществим.

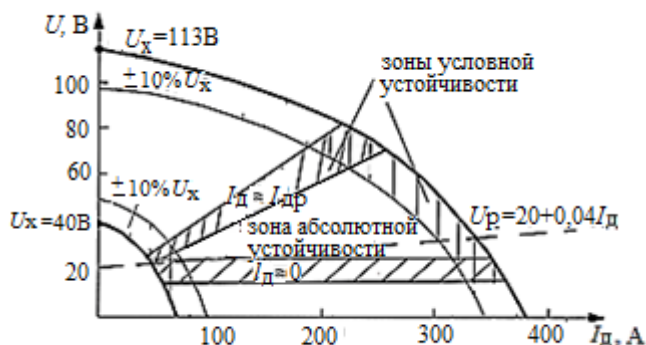


Рис. 4.25. Зоны устойчивых режимов конвенционального источника для ручной сварки ($I_{ном} = 315 А$, $U_{ном} = 32,6 В$)

Если ток настраивается изменением сопротивления источника, а не напряжения холостого хода, то зона устойчивых режимов в сравнении с рис 4.25 расширяется, поскольку ее верхняя граница поднимается до уровня, соответствующего постоянному и более высокому значению U_x .

Типичная внешняя вольт-амперная характеристика современного источника постоянного тока — комбинированная, состоящая из четырех участков (рис. 4.26). Назначение и параметры отдельных участков по требованиям обеспечения устойчивости были сформулированы выше, поэтому здесь только уточним и согласуем их числовые значения.

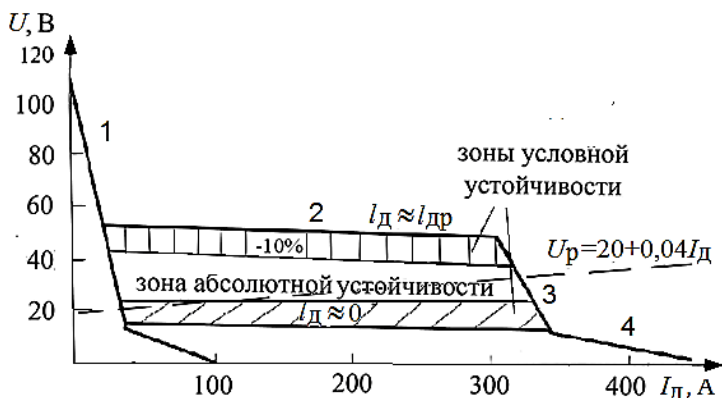


Рис. 4.26. Зоны устойчивых режимов современного источника для ручной сварки ($I_{ном} = 315$ А, $U_{ном} = 32,6$ В)

Участок подпитки 1 предназначен для заполнения пауз в сварочном токе, образующихся при фазовом и частотном регулировании ($U_{x1} = 80\text{--}113$ В, $I_{к1} = 5\text{--}30$ А). Жесткий участок 2 обеспечивает оптимальную эластичность дуги ($U_{x2} = 35\text{--}70$ В, $\rho_{н2} = 0 \dots - 0,07$ В/А). Основной падающий участок 3 гарантирует принципиальную устойчивость системы «источник–дуга» ($\rho_{н3} = -\infty \dots - 1$ В/А, при сварке на вертикали до $-0,2$ В/А). Участок короткого замыкания 4 обеспечивает форсирование при сварке с технологическими короткими замыканиями ($U_{x4} = 7\text{--}15$ В, $\rho_{н4} = 0 \dots - 0,07$ В/А). Такая характеристика формируется инверторным источником или тиристорным выпрямителем с МП-управлением за счет обратных связей по току и напряжению, возможно — также вспомогательными источниками высоковольтной и низковольтной подпитки. Настройка сварочного тока выполняется смещением участка 3 за счет сигнала задания тока. Настройка тока короткого замыкания, не зависящего от сварочного тока, осуществляется изменением параметров участка 4.

Границы зоны устойчивых режимов у современного источника поддерживаются более четко, чем у конвенционального. Верхняя граница задается участком 2 в зависимости от необходимой эластичности дуги при конструировании или настройке источника и соблюдается довольно точно. Правда, при использовании для формирования этого участка полнофазного включения тиристоров и эта граница размывается с колебаниями до -10% , как у напряжения сети. Нижняя граница, как и у конвенционального источника, задается напряжением предельно короткой дуги $U_{дmin} \approx U_{ка}$. Левая и правая границы поддерживаются с высокой точностью благодаря системам стабилизации режима при разных возмущениях. Устойчивости при низких режимах способствует высоко-

вольтная подпитка 1. Устойчивость при технологических коротких замыканиях обеспечивается благодаря форсированию дуги на участке 4.

4.7.2. Механизированная сварка плавящимся электродом в защитном газе.

Типичная внешняя вольт-амперная характеристика конвенционального источника для сварки в активных газах — жесткая с напряжением холостого хода от 15 до 60 В и наклоном от $-0,07$ до $-0,02$ В/А (рис. 4.27). Жесткая характеристика обычно формируется трансформатором с нормальным рассеянием, входящим в состав диодного выпрямителя. Витковая настройка напряжения выполняется с помощью секционированных обмоток трансформатора. Динамические свойства выпрямителя корректируются дросселем в сварочной цепи.

Границы зоны устойчивых режимов, обеспечиваемых системой АРДС, показаны на рис. 4.28 с учетом возмущений по параметрам дуги и по сопротивлению сварочной цепи (более значительные возмущения по напряжению сети учтем позже).

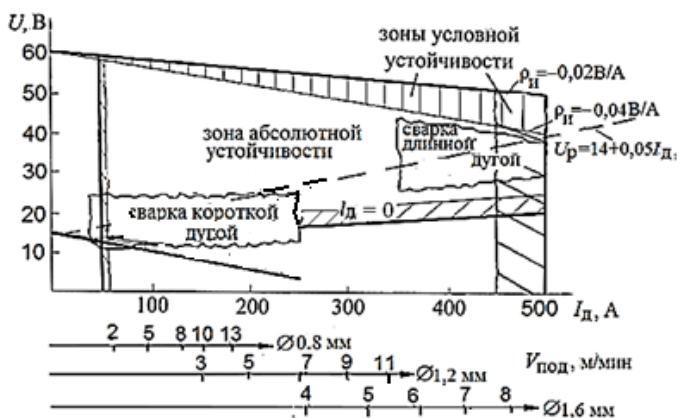


Рис. 4.27. Зоны устойчивых режимов конвенционального источника для механизированной сварки в активных газах ($I_{ном} = 500$ А, $U_{ном} = 39$ В)

Тонкими линиями ограничена зона абсолютной устойчивости, а жирными — она же с добавлением участков условной устойчивости. Нижняя граница с напряжением $U_{дmin} \approx U_{ка} = 13$ В соответствует предельно короткой дуге при сварке в углекислом газе ($I_{д} \approx 0$). Нижняя граница размыта, поскольку сумма катодного и анодного падений напряжения $U_{ка}$ для типичных сварочных материалов составляет от 13 до 25 В [8]. С ростом тока $U_{ка}$ несколько увеличивается. Верхняя граница определяется положением внешней характеристики источника с $U_x = 60$ В. А к

наклону этой характеристики ($\rho_{\text{н}} = -0,02 \text{ В/А}$) может быть добавлен наклон, вызванный увеличением сопротивления источника из-за нагрева и ростом сопротивления внешней сварочной цепи — сварочных проводов, обмотки дросселя и т.д. Характеристика с учетом типичных значений таких возмущений ($\rho_{\text{н}} = -0,04 \text{ В/А}$) показана тонкой линией, которая сужает зону абсолютной устойчивости. Положение внешней характеристики задает вместе со скоростью подачи длину дуги по уравнению (2.5). График условной рабочей нагрузки, соответствующий по ГОСТ 60974-1-2012 уравнению $U_p = 14 + 0,05I_{\text{д}}$, размещается внутри зоны абсолютной устойчивости.

Если учесть еще и колебания напряжения сети $\pm 10 \%$, то верхняя граница будет начинаться не от 60 В, как показано на рис. 4.27, а от $U_{\text{x}} = 49 \text{ В}$, и зона абсолютной устойчивости существенно сократится (см. рис. 4.25).

Другим независимым параметром настройки (кроме U_{x}) является скорость подачи электродной проволоки $V_{\text{под}}$, а уже она задает значение сварочного тока в соответствии с уравнением (4.5). Поэтому границы зоны устойчивости полезно анализировать в координатах $U_{\text{св}}-V_{\text{под}}$. С этой целью на рис. 4.27 дополнительно нанесены координатные оси $V_{\text{под}}$, полученные для стальных проволок диаметром 0,8; 1,2 и 1,6 мм по экспериментальным данным [53, 62].

Значение минимальной технологически оправданной скорости подачи $V_{\text{подmin}}$, соответствует началу регулярного переноса электродного металла и удовлетворительного формирования сварного шва. Как было показано в разд. 4.2.2, $V_{\text{подmin}}$ составляет от 1,4 до 1,8 м/мин и почти не зависит от диаметра проволоки. В приведенном примере левая граница зоны устойчивых режимов задана значением $V_{\text{подmin}} = 1,5 \text{ м/мин}$ для проволоки диаметром 0,8 мм, что соответствует $I_{\text{свmin}} = 50 \text{ А}$. Максимально допустимая скорость подачи $V_{\text{подmax}}$ ограничивается из-за чрезмерного укорочения дуги. Эту скорость можно вычислить с помощью уравнения (2.5), если задаться минимально допустимой длиной дуги, например, $l_{\text{дmin}} = 5 \text{ мм}$. Но в приведенном примере правая граница зоны задана значением номинального тока источника ($I_{\text{свmax}} = I_{\text{ном}} = 500 \text{ А}$), которое достигается для проволоки диаметром 1,6 мм при $V_{\text{под}} = 9 \text{ м/мин}$. Зона абсолютной устойчивости уменьшена с обеих сторон для учета возможных колебаний скорости подачи на $\pm 10 \%$, что вероятно при питании нестабилизированных приводов подачи от сети.

Зоны предпочтительных режимов сварки плавящимся электродом в активных газах (MAG) выделим в связи с особенностями переноса электродного металла. Для этого на рис. 4.27 волнистыми линиями показаны зоны настройки режимов при сварке короткой и длинной дугой.

Сварка на малых токах (до 200–250 А) по условиям формирования шва требует короткой дуги — в углекислом газе длиной до 5 мм. В этих условиях технологически устойчивый процесс с регулярным чередованием стадий дугового разряда и короткого замыкания возможен, как показано в разд. 4.5, только при сравнительно низком напряжении источника (см. рис. 4.20). Поэтому зона возможных режимов сварки короткой дугой ограничена сверху напряжением 25–30 В. Ограничение снизу может составлять 14–15 В, т.е. даже ниже напряжения дуги. Дело в том, что источник с дросселем способен перераспределять энергию между двумя стадиями нагрузки (дуги с напряжением 18–25 В и внешней сварочной цепи при коротком замыкании с напряжением 5–10 В).

Сварка на больших токах (более 300–350 А) по условиям качественного формирования шва требует настройки более высокого напряжения, а поэтому и более длинной дуги. При сварке длинной дугой верхняя граница зоны устойчивости образуется внешней характеристикой источника со сравнительно высоким напряжением холостого хода 45–60 В. Нижняя граница также поднимается до 25–30 В, чтобы снизить вероятность коротких замыканий каплями.

Сварка в среднем интервале токов (200–350 А) при питании от конвенциональных источников затруднена из-за необходимости принятия специальных мер для предотвращения чрезмерного разбрызгивания электродного металла (см. разд. 8.2.3).

При механизированной сварке плавящимся электродом в инертном газе (MIG) — в аргоне и смесях на его основе — дуга значительно устойчивей, а диапазон ее напряжений начинается с 8 В. Крупнокапельный перенос при низких токах идет гораздо спокойней, а более благоприятный струйный перенос достигается простыми технологическими приемами. При добавке небольшого количества кислородсодержащих газов (до 25 % CO_2 или 5% O_2) перенос становится мелкокапельным, оставаясь спокойным. Поэтому при сварке тонкой проволокой аппаратом системы АРДС используют источники не только с жесткой, но и пологопадающей характеристикой ($\rho_{\text{и}}$ от – 0,04 до – 0,2 В/А) [53].

При механизированной сварке порошковой проволокой (FCAW) тоже используют источники не только с жесткой, но и с пологопадающей характеристикой. При сварке короткой дугой ($U_x < 25$ В), и особенно при использовании самозащитной проволоки (FCAW-S) наклон характеристики снижают.

Типичная внешняя вольт-амперная характеристика современного источника для механизированной сварки в защитных газах — комбинированная, состоящая из четырех участков (рис. 4.28). Участок высоковольтной подпитки 1 имеет напряжение холостого хода 60–113 В и ток короткого замыкания 10–50 А. Он предназначен для заполнения пауз в

кривой сварочного тока, и тем самым способствует восстановлению дуги после окончания стадии короткого замыкания каплей. Жесткий основной участок 2 обычно формируется системой автоматической стабилизации, содержащей в своем составе полупроводниковый регулятор напряжения. С помощью этого регулятора участок 2 может смещаться по вертикали, при этом сварочное напряжение настраивается в интервале 8–44 В. Участок отсечки 3 ограничивает предельное значение сварочного тока, благодаря чему защищает источник и другие токоведущие элементы аппарата от перегрева. К устойчивости сварочного процесса этот участок отношения не имеет. Участок низковольтной подпитки 4 необходим для независимой настройки тока короткого замыкания (увеличения $I_{кз}$ на 100–300 А). Это может оказаться полезным для управления переносом электродного металла с короткими замыканиями каплями, а поэтому и для повышения устойчивости (см. разд. 4.5.3).

У современных аппаратов для механизированной и автоматической сварки в защитных газах зона абсолютно устойчивых режимов шире, чем у конвенциональных, благодаря стабилизации с помощью обратных связей как напряжения у источника, так и скорости подачи у привода.

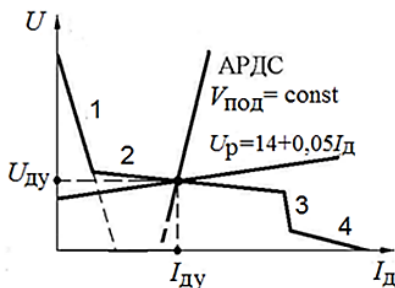


Рис. 4.28. Внешняя характеристика современного источника для механизированной сварки в защитных газах

4.7.3. Автоматическая сварка плавящимся электродом под флюсом.

Тип внешней характеристики источника для сварки под флюсом назначается в зависимости от способа поддержания дуги в комплектующем источнике автомате — системы АРДС или АРНД_v (рис. 4.29). График условной рабочей нагрузки по требованию ГОСТ 60974-1-2012 соответствует уравнению $U_p = 20 + 0,04I_d$, а при токе более 600 А — постоянной величине 44 В.

При сварке аппаратом с постоянной скоростью подачи, работающим по принципу саморегулирования (АРДС), источник должен иметь

в основном жесткую характеристику с $\rho_{\text{н}}$ от $-0,01$ до $-0,1$ В/А (рис. 4.29, а). При этом обеспечивается достаточная устойчивость системы «источник–дуга» и высокое быстродействие процесса саморегулирования. Из-за шунтирующего действия расплавленного шлака напряжение холостого хода приходится увеличивать до $U_{\text{х}} = 50\text{--}141$ В. При жесткой характеристике ток короткого замыкания сравнительно большой — $I_{\text{к}} = (1,5\text{--}3)I_{\text{д}}$. При сварке на низких режимах (с плотностью тока в электроде менее $25\text{--}30$ А/мм²) для повышения устойчивости рекомендуется комбинированная внешняя характеристика с повышенным напряжением холостого хода [45].

Регулятор источника используется для настройки напряжения дуги. На рис. 4.29, а видно, что при увеличении напряжения холостого хода от $U_{\text{х1}}$ до $U_{\text{х2}}$ напряжение дуги возрастает от $U_{\text{д1}}$ до $U_{\text{д2}}$. А при уменьшении сопротивления источника или уменьшении наклона его характеристики от $\rho_{\text{н2}}$ до $\rho_{\text{н3}}$ напряжение увеличится от $U_{\text{д2}}$ до $U_{\text{д3}}$. Ток $I_{\text{д}}$ в системе АРДС настраивается регулятором скорости подачи проволоки $V_{\text{под}}$ (см. рис. 4.9, б).

При сварке аппаратом с автоматическим регулированием напряжения дуги (АРНД_в) источник должен иметь падающую характеристику с $\rho_{\text{н}}$ от $-0,1$ до $-0,3$ В/А (рис. 4.29, б). При этом обеспечивается устойчивость системы «источник–дуга» и стабильность тока, тогда как автоматический регулятор подающего механизма гарантирует высокое быстродействие и стабилизацию напряжения дуги. Напряжение холостого хода источника должно быть высоким — $U_{\text{х}} = 70\text{--}141$ В, а ток короткого замыкания сравнительно небольшим — $I_{\text{к}} = (1,5\text{--}2)I_{\text{д}}$. Регулятор источника используется для настройки тока. На рис. 4.29, б показано, что при увеличении напряжения холостого хода от $U_{\text{х1}}$ до $U_{\text{х2}}$ и уменьшении сопротивления источника от $Z_{\text{и2}}$ до $Z_{\text{и3}}$ ток увеличивается от $I_{\text{д1}}$ до $I_{\text{д2}}$ и до $I_{\text{д3}}$. Напряжение дуги настраивается задатчиком $U_{\text{зн}}$ в регуляторе автомата, как было показано на рис. 4.11, б.

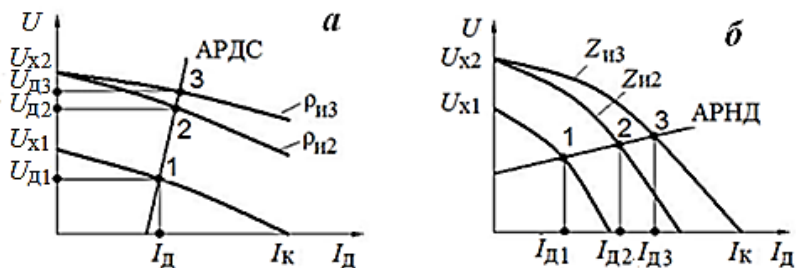


Рис. 4.29. Внешние характеристики источника для автоматической сварки аппаратами систем АРДС (а) и АРНД_в (б)

4.7.4. Аргонодуговая сварка неплавящимся электродом.

Внешняя характеристика конвенционального источника — падающая (рис. 4.30, а). Напряжение у дуги прямой полярности относительно мало — 8–30 В, а характеристика условной рабочей нагрузки по ГОСТ 60974-1-2012 выражается уравнением $U_p = 10 + 0,04I_d$. Поэтому для обеспечения устойчивости напряжение холостого хода может быть небольшим — $U_x \geq 40$ В. Но у конвенционального источника с монотонно падающей характеристикой для удовлетворения другого важного требования — стабильности тока — приходится U_x поднимать до высокого, в том числе предельно допустимого по условиям безопасности значения — 60–113 В. При этом наклон внешней характеристики в диапазоне рабочих токов составляет от -3 до $-0,2$ В/А. На пересечении характеристик источника и условной рабочей нагрузки в точке В получается настроенный ток $I_{ду}$.

Комбинированная характеристика современного источника может иметь четыре участка (рис. 4.30, б). Участок подпитки 1 (80–113 В, 5–30 А) необходим для заполнения провалов тока основного источника. Исходный жесткий участок 2 основного источника (30–50 В) ограничивает эластичность дуги. Основной падающий участок 3 ($-\infty \dots -1$ В/А) используется для настройки тока $I_{ду}$ в точке В и обеспечивает высокую устойчивость процесса и стабильность тока. Участок 4 ограничения тока короткого замыкания $I_{ок} = 5\text{--}30$ А предназначен для мягкого пуска. С этой целью может использоваться и высоковольтная подпитка с током $I_{мп}$ на продолжении участка 1.

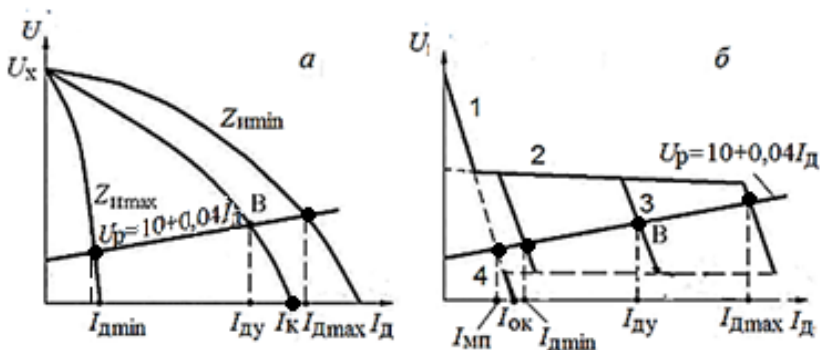


Рис. 4.30. Внешние характеристики конвенционального (а) и современного (б) источников для аргонодуговой сварки

5. УСТОЙЧИВОСТЬ ПРОЦЕССА СВАРКИ НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ

5.1. Феноменология устойчивого дугового процесса на переменном токе

Выполненный ниже анализ электрических процессов в дуге переменного тока опирается на основные положения фундаментальной работы Г.И. Лескова [7]. Устойчивость горения дуги при сварке на переменном токе ниже, чем на постоянном. Источник переменного тока должен обладать специфическим свойством — обеспечивать многократные и регулярные повторные зажигания дуги.

Процесс повторного зажигания дуги при переходе тока через нуль рассмотрим с помощью осциллограмм (рис. 5.1, а). В конце полупериода, предшествующего рассматриваемому, с момента t_1 напряжение трансформатора становится недостаточным для поддержания дуги. В результате дуга угасает, а ток резко снижается. С момента угасания t_1 температура межэлектродного промежутка $T_{мэ}$ быстро падает, а его сопротивление $R_{мэ}$ резко возрастает (рис. 5.1, б).

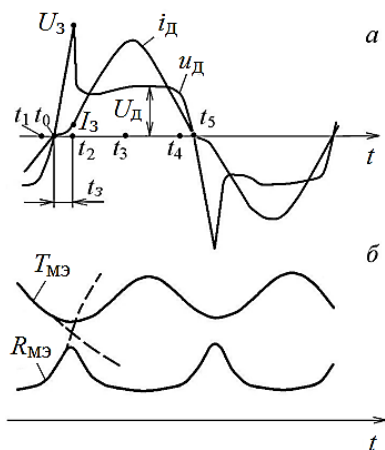


Рис. 5.1. Схематические осциллограммы дуги переменного тока: а — ток $i_д$ и напряжение $u_д$, б — температура $T_{мэ}$ и сопротивление $R_{мэ}$ межэлектродного промежутка

После перехода тока через нуль в момент t_0 направление ЭДС трансформатора изменяется на противоположное. Дуговой разряд мгновенно в момент t_0 восстановиться не может, поскольку для этого недостаточно напряжение источника. Небольшой преддуговой ток, суще-

ствующий при этом в межэлектродном промежутке, создается за счет остаточной плазмы (не более 0,1 мс после угасания дуги) и термоэлектронной эмиссии с неостывшего еще катода (в течение 1–10 мс). По мере нарастания напряжения источника растет и преддуговой ток, но скорость его увеличения, вплоть до момента t_2 , существенно ниже, чем скорость снижения в момент t_1 . В переходном периоде t_0 – t_2 идут встречные процессы: с одной стороны, ускоряющаяся ионизация межэлектродного газа с его нагревом нарастающим током, с другой стороны, деионизация и охлаждение за счет теплоизлучения и теплоотвода в электрод, изделие и окружающую атмосферу.

Возможны три варианта развития повторного зажигания в зависимости от условий сварки. В первом варианте при достаточно благоприятных условиях (неплавящийся электрод, легкоионизируемые компоненты сварочных материалов, большой ток), когда напряжение источника достигнет величины U_d , дуговой разряд легко восстанавливается. Второй вариант с менее благоприятными условиями (рис. 5.1) наблюдается в большинстве случаев (ручная сварка покрытыми электродами с основным или целлюлозным покрытием, сварка под флюсом с большим содержанием флюорита и т.д.). Здесь дуга возобновляется только в момент t_2 при достижении источником довольно высокой величины — напряжения повторного зажигания U_3 . В третьем варианте, характеризующимся наиболее неблагоприятными условиями (слабая эмиссия электронов с катода, обдув дуги газовыми потоками, холодные изделие и сварочная ванна), температура T_m резко снижается, а сопротивление R_m так же резко возрастает, как показано штриховыми линиями на рис. 5.1, б, и дуга обрывается.

В случае успешного повторного зажигания напряжение дуги снижается от U_3 до U_d и сохраняется на этом уровне до следующего угасания в момент t_4 . Ток после зажигания быстро возрастает и далее изменяется по кривой, близкой к синусоиде, достигая максимума в момент t_3 . С момента t_5 начинается повторное зажигание в следующем полупериоде.

Динамическая вольт-амперная характеристика дуги $u_d = f(i_d)$, отражающая связь мгновенных значений напряжения и тока частотой 50 Гц, показана на рис. 5.2. Номера точек соответствуют индексам моментов на осциллограмме (рис. 5.1). Динамическую характеристику можно получить на электроннолучевом осциллографе, подавая на горизонтальную развертку сигнал, пропорциональный току, а на вертикальную — напряжение дуги. Здесь на участке 1–0 отражен процесс угасания дуги в полупериоде обратной полярности, 0–2 — процесс зажигания в полупериоде прямой полярности, 2–3 — дуговой разряд при нарастании тока, 3–4 — дуговой разряд при спаде тока, 4–0 — угасание дуги и т.д.

На динамической характеристике процесса ручной сварки покрытым электродом легко фиксируются напряжение U_3 и ток I_3 повторного зажигания. Обращает на себя внимание большой пик напряжения зажигания дуги обратной полярности $U_{3,обр}$. Дело в том, что в этот момент катодом становится сравнительно холодная сварочная ванна с невысокой эмиссионной способностью. Заметно также, что максимальное значение тока I_m в полупериоде прямой полярности выше, а напряжение ниже соответствующих величин для полупериода обратной полярности. Динамическая характеристика на участке 2–3 нарастания тока проходит выше, чем на участке спада 3–4. Таким образом при частоте 50 Гц проявляется инерционность тепловых процессов в дуге.

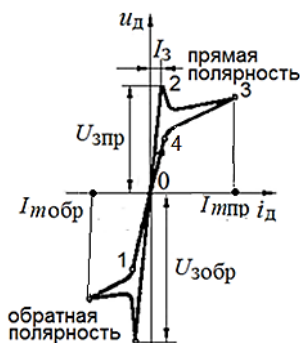


Рис. 5.2. Динамическая вольт-амперная характеристика дуги переменного тока

Статическая вольт-амперная характеристика дуги переменного тока $U_d = f(I_d)$ строится не для мгновенных, а для действующих, т.е. среднеквадратических значений. В эксперименте такая характеристика получается при использовании приборов электромагнитной системы — вольтметра и амперметра. Характеристика $U_d = f(I_d)$ подобна той, которая была ранее показана для дуги постоянного тока (см. рис. 4.8, б).

5.2 Непосредственные критерии устойчивости на переменном токе

Универсальные критерии оценки устойчивости одинаковы для источников постоянного и переменного тока — это частота обрывов $n_{обр}$, минимально возможный ток $I_{свmin}$ и разрывная длина дуги $l_{др}$. Методика их определения описана в разд. 4.2, а некоторые результаты приведены в табл. 5.1. Отметим только оригинальные методы фиксирования обрывов дуги.

При обрыве дуги в размыкающейся сварочной цепи возникает всплеск ЭДС, вызванный явлением самоиндукции. В одной из первых работ по автоматической сварке, проведенной Б.Е.Патоном в 1950 г. для оценки стабилизирующих свойств разных флюсов, а тем самым и устойчивости энергетической системы «трансформатор–автомат–дуга», использовалось осциллографирование сварочного напряжения [63]. При этом момент обрыва дуги фиксировался по броску потенциала выше напряжения холостого хода.

Более совершенная, автоматизированная система для фиксирования частоты обрывов описана в работе [64]. Здесь по команде датчика сварочного напряжения, обнаружившего обрыв, включается осциллятор для искусственного зажигания дуги, а вместе с ним и счетчик обрывов. Типичные значения частоты обрывов при использовании трансформатора ТС-500 для электродов основного типа $n_{обр} = 40\text{--}100$ раз/эл, но особенно большое для электродов УОНИ 13/45 — 190–290. Разумеется, такой эксперимент дает многократно завышенную частоту обрывов в сравнении с естественным процессом сварки. Действительно, счетчик обрывов фиксирует даже неопасные перерывы в горении дуги, которые в естественных условиях устраняются самопроизвольно, незаметно для сварщика. Тем не менее, описанная методика проверки устойчивости дуги переменного тока полезна для предварительной оценки. Кроме того, в описанном примере доказана возможность применения трансформатора ТС-500 для сварки электродами с основным покрытием, не предназначенными для сварки на переменном токе, в случае дополнения схемы осциллятором.

Критерии надежности повторного зажигания как характеристики устойчивости специфичны именно для источников переменного тока. Поскольку переменный сварочный ток обычно является током вторичной обмотки сварочного трансформатора, то эти критерии определяются при анализе начальных участков осциллограмм вторичных тока i_2 и напряжения u_2 при переходе тока через нуль (рис. 5.3). Среди критериев самые простые — это напряжение U_3 [63, 65], ток I_3 [7] и время t_3 [47] повторного зажигания. Типичные значения этих характеристик при ручной сварке покрытыми стальными электродами следующие. Напряжение $U_3 = 15\text{--}90$ В, максимальный преддуговой ток (ток повторного зажигания) $I_3 = 2\text{--}30$ А, время t_3 составляет от 0,1 до 3 мс [7, 9]. Устойчивость повышается с увеличением тока I_3 и снижением напряжения U_3 и времени t_3 .

Время повторного зажигания t_3 , чаще других принимаемое в качестве непосредственного критерия, зависит от параметров дуги и источника [50]:

$$t_3 = \frac{\arcsin \frac{U_3}{U_{2m}} - \operatorname{arctg} \frac{2\pi f L}{R_H + R_d}}{2\pi f}. \quad (5.1)$$

Чем меньше время зажигания, тем меньше охлаждение межэлектродного промежутка и тем вероятней повторное зажигание. Как уже отмечалось, в переходном периоде идут два встречных процесса — охлаждение и нагрев межэлектродного промежутка. Уменьшить t_3 , т.е. повысить устойчивость, можно либо технологическими приемами — замедляя охлаждение и деионизацию межэлектродного промежутка, либо электротехническими приемами — ускоряя нагрев благодаря увеличению скорости нарастания напряжения и тока трансформатора.

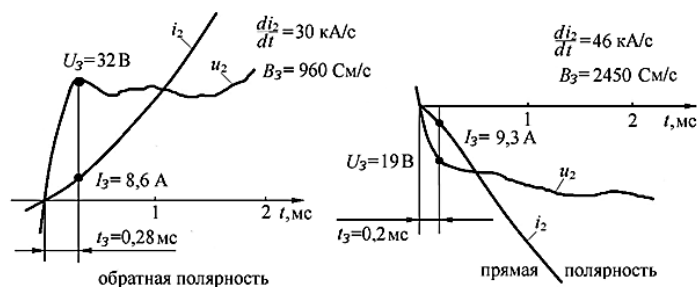


Рис. 5.3. Начальные участки осциллограмм напряжения и тока дуги (трансформатор ТДМ-401, электрод ОЗС-4, Ø3 мм, 100 А)

Скорость восстановления проводимости межэлектродного промежутка [9] в преддуговом интервале

$$B_3 = \frac{I_3}{U_3 t_3} \quad (5.2)$$

— это комплексный критерий устойчивости, учитывающий как значения времени t_3 , так и напряжения U_3 и тока I_3 повторного зажигания, которые можно получить в эксперименте по начальным участкам осциллограмм (рис. 5.3). Единица измерения этого критерия — сименс в секунду ($\text{См/с} = \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{с}}$). Критерий обладает ясным физическим смыслом — понятно, что при высокой скорости восстановления проводимости B_3 выше и вероятность повторного зажигания. Так, у электродов с большим содержанием CaF_2 в покрытии, известных низкой устойчивостью горения дуги, $B_3 = 40\text{--}3000 \text{ См/с}$, а у электродов с рутиловым покрытием, предназначенных именно для сварки на переменном токе, $B_3 = 700\text{--}8000 \text{ См/с}$. Обнаружено также, что при сварке покрытыми электродами скорость B_3 в полупериоде прямой полярности в 1,5–5 раз выше, чем при обратной полярности. Поэтому и обрыв дуги переменного тока, как правило, происходит при переходе от прямой к обратной полярности. По этой же причине сварка вольфрамовым электро-

дом алюминия, как правило, не возможна без импульсной стабилизации в полупериоде обратной полярности (см. разд. 5.6).

Скорость нарастания тока $(di_2/dt)_3$ в интервале повторного зажигания также принимают в качестве критерия устойчивости [7]. Ее можно вычислить по осциллограммам сварочного тока (рис. 5.3):

$$(di_2/dt)_3 \approx I_3/t_3 \quad (5.3)$$

Но более эффективно ее экспериментальное определение по осциллографической записи фазовой характеристики $di_2/dt = f(i_2)$ (рис. 5.4). Она получается, если подать на вход горизонтальной развертки электронно-лучевого осциллографа сигнал i_2 с шунта, установленного в сварочной цепи, а на вертикальный вход — сигнал di_2/dt с дифференцирующей RC -цепочки, подключенной к этому же шунту [7]. Видно, что непосредственно перед переходом тока через нуль наблюдается пик скорости, соответствующий резкому спаду тока при угасании $(di_2/dt)_y$, а после перехода — провал до значения, соответствующего низкой скорости нарастания тока при повторном зажигании $(di_2/dt)_3$. Типичные значения скоростей 10–150 кА/с. Чем выше скорость $(di_2/dt)_3$, тем надежнее повторное зажигание и выше устойчивость процесса сварки. Минимальное значение 10 кА/с, соответствующее еще устойчиво горящей дуге, получено в испытаниях трансформатора СТЭ-24-У ($U_x = 60$ –65 В) с отдельным дросселем при сварке электродами УОНИ 13/45 (Ø4 мм, 170 А, 24 В) [66].

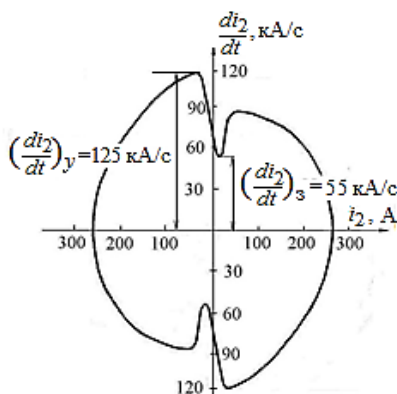


Рис. 5.4. Фазовая характеристика $di_2/dt = f(i_2)$
(трансформатор ТДМ-401, электрод ОЗС-4, Ø5 мм, 200 А)

Разработан ряд электротехнических приемов, направленных на увеличение этой скорости [7]. С этой целью снижают вихревые токи в магнитопроводе и кожухе трансформатора, не допускают насыще-

ния железа магнитопровода. Иногда в цепь дуги включают дроссель насыщения, ограничивающий амплитуду тока, но увеличивающий скорость нарастания тока в 2–4 раза, в результате чего кривая сварочного тока вместо синусоидальной принимает форму трапецеидальных импульсов (см. рис. 6.5, д) [24, 67]. Но самым эффективным приемом увеличения скорости является использование импульсного стабилизатора, подающего на дугу кратковременные импульсы тока после его перехода через нуль (разд. 5.5).

Для сравнения трансформаторов неодинаковой мощности удобно характеризовать их не абсолютной, а относительной скоростью $(di_2/dt)_3/(di_2/dt)_\kappa$, которую желательно приближать к 1 [54]. У большинства сварочных трансформаторов эта величина находится в интервале 0,3–0,8.

Подробное описание множества других критериев устойчивости, также опирающихся на анализ осциллограмм, приведено в работах [9, 54, 69–72]. Иногда начальная скорость нарастания тока при зажигании соотносится с максимальной скоростью для неискаженной синусоиды такого же значения тока $(di_2/dt)_m = I_m 2\pi f$ или со скоростью нарастания тока короткого замыкания $(di_2/dt)_\kappa = \sqrt{2} I_\kappa 2\pi f$

Используется также комплексный показатель

$$F = U_x \frac{(di_2/dt)_3}{(di_2/dt)_\kappa}, \quad (5.4)$$

который учитывает полезное влияние на устойчивость как увеличения напряжения холостого хода U_x , так и увеличения скорости $(di_2/dt)_3$ [69]. У трансформаторов промышленного назначения $F = 20$ –60 В, при том что достаточным для надежного повторного зажигания считается значение $F = 40$ –50 В. У бытовых и монтажных трансформаторов, для которых приоритетной характеристикой является малая масса, а не сварочные свойства, $F = 17$ –35 В.

Пример оценки устойчивости по непосредственным критериям показан в табл. 5.1. Сравнивались два трансформатора с подвижными обмотками — ТДМ-401 и ТДМ-504М. Визуальная оценка по частоте обрывов на нормальных режимах у обоих трансформаторов высокая ($n_{обр} = 0$). Более точно нарушения процесса выявлялись с помощью осциллограмм сварочного тока и напряжения. На одном из проблемных участков осциллограммы (рис. 5.5) обнаружены два коротких замыкания каплями длительностью 6 и 8 мс и один обрыв длительностью 10 мс. Такие нарушения не затягиваются и устраняются самопроизвольно без участия сварщика. Конечно, они признаются допустимыми, а процесс — устойчивым.

По начальным участкам осциллограмм вычислялось время повторного зажигания t_3 (см. рис. 5.3). Оно составило от 0,13 до 0,35 мс, т.е. не более 3,5 % длительности полупериода, что и объясняет высокую устойчивость

процесса. В этом же убеждает и анализ эластичности дуги — для обоих трансформаторов разрывная длина дуги на одинаковых режимах примерно одинакова. А на разных режимах разрывная длина составляет $l_{др} = (3-9)d_z$, снижаясь лишь во втором диапазоне настройки, где у обоих трансформаторов меньше напряжение холостого хода.

Таблица 5.1.

Непосредственные критерии устойчивости дуги переменного тока при ручной сварке покрытым электродом (ОЗС-4)

Источник		ТДМ-504М			ТДМ-401		
Напряжение холостого хода, В		74	74	58	76	77	58
Диаметр электрода, мм		4	5	6	3	4	5
Сварочный ток, А (нормальный)		150	200	260	100	150	200
Сварочное напряжение, В		25	26	26	22	21	22
Частота обрывов $n_{обр}$, раз/эл	при токе нормальном	0	0	0	0	0	0
	при токе пониженном (вертикальное положение)	0	—	—	0	0,3	—
Минимально возможный сварочный ток $I_{свmin}$, А		85*	85*	85*	55*	55*	55*
Разрывная длина дуги $l_{др}$, мм		26	25	20	28	35	20
Время повторного зажигания t_3 , мс**		0,17/ 0,13	0,23/ 0,18	0,33/ 0,16	0,35/ 0,19	0,28/ 0,23	0,21/ 0,20
Напряжение повторного зажигания U_3 , В**		22/ 16	28/ 15	31/ 15	26/ 18	27/ 20	19/ 17
Ток повторного зажигания I_3 , А**		10,2/ 8,7	18,3/ 15,1	22/ 12,5	12,6/ 8,5	15,5/ 8,1	15,6/ 12,6
Скорость восстановления проводимости B_3 , См/с**		3450/ 5140	3280/ 5580	2090/ 5440	2160/ 3520	2242/ 2760	4050/ 3730
Относительная скорость нарастания тока $(di_2/dt)_3/(di_2/dt)_y$		0,67	0,70	0,57	0,73	0,70	0,65

Показатель $F = U_x \frac{(di_2/dt)_z}{(di_2/dt)_k}, \text{ В}$	45	49	32	52	52	36
--	----	----	----	----	----	----

* дуга горит при минимальном токе источника,

** полупериод полярности обратной/прямой

При сварке на пониженном токе устойчивость достаточная, если не считать одного случая у трансформатора ТДМ-401 (электрод ОЗС-4, Ø4 мм, 130 А, вертикальное положение), где зафиксирован 1 обрыв при расплавлении трех электродов. Относительная скорость нарастания преддугового тока $(di_2/dt)_z/(di_2/dt)_y$ для обоих трансформаторов достаточно высока — 0,57–0,73, причем меньшие значения в этом диапазоне относятся к режимам с малым током и низким напряжением холостого хода. Удовлетворительна оценка обоих трансформаторов и по величине комплексного показателя $F = 32\text{--}52 \text{ В}$.

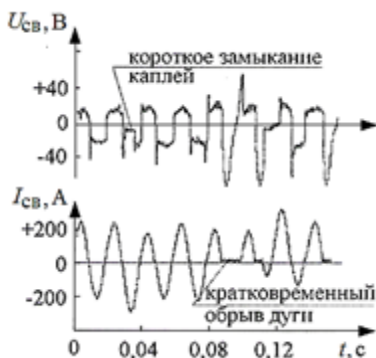


Рис. 5.5. Оценка устойчивости при сварке на переменном токе (трансформатор ТДМ-401, электрод ОЗС-4, Ø4 мм, 150 А, 25 В)

5.3. Косвенные критерии устойчивости на переменном токе

5.3.1. Математическое описание электрических процессов при сварке на переменном токе

Работа сварочного трансформатора на дугу анализируется с помощью схемы замещения, которая содержит идеальный трансформатор с нормальным рассеянием и катушку индуктивности для имитации индуктивного сопротивления реального трансформатора (рис. 5.6). Катушка в такой цепи, обладая значительным сопротивлением $X_L = \omega L$, обеспечивает получение падающей внешней характеристики, настройку режима и повышение устойчивости.

Связь электрических величин представим системой уравнений [50]:

$$\left. \begin{aligned} i_2 &= I_{2m} \sin \omega t — && \text{ток без учета искажений,} \\ u_2 &= U_{2m} \sin(\omega t + \varphi) — && \text{трансформатор,} \\ u_d &= U_d \text{ (при } t = 0 \text{ } u_d = U_3) — && \text{дуга,} \\ u_L &= U_{Lm} \sin(\omega t + \pi/2) — && \text{катушка индуктивности.} \end{aligned} \right\} \quad (5.5)$$

При этом баланс напряжений

$$U_{2m} \sin(\omega t + \varphi) = U_d + L \frac{di_2}{dt}. \quad (5.6)$$

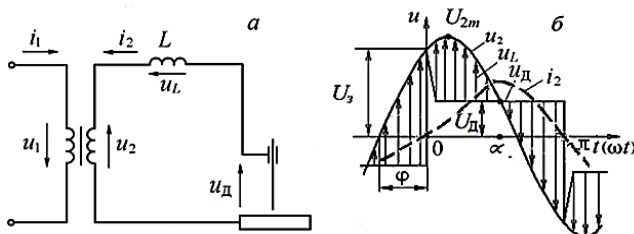


Рис. 5.6. Дуга переменного тока в цепи с катушкой индуктивности:
а — схема, б — осциллограммы тока и напряжения
(напряжение u_L показано линиями со стрелками)

Переходные процессы при повторном зажигании дуги в цепи с катушкой (рис. 5.6, б) иллюстрируют почти непрерывное горение дуги. Действительно, поскольку катушка обеспечивает сдвиг фазы тока i_2 относительно фазы напряжения u_2 , то повторное зажигание дуги идет в благоприятных условиях. Оно начинается в момент 0 после задержки тока на угол φ , когда напряжение трансформатора уже достигло величины U_3 , необходимой для повторного зажигания дуги. Условие непрерывности тока в момент 0 из (5.6):

$$U_{2m} \sin \varphi = U_{Lm} \geq U_3 \quad (5.7)$$

Переходные процессы при угасании дуги в конце полупериода также протекают благоприятно. На рис. 5.6, б видно, что в интервале $0-\alpha$ катушка, являясь, как и дуга, нагрузкой, запасается энергией. А в интервале $\alpha-\pi$, когда напряжение трансформатора u_2 становится ниже необходимого для горения дуги значения U_d , катушка возвращает энергию, действуя как источник. Из-за подпитывающего действия катушки снижение тока i_2 до 0 происходит в момент π , а не раньше. Условие непрерывности тока в момент π из (5.6):

$$U_{2m} \cos \varphi \geq U_d \pi/2. \quad (5.8)$$

5.3.2. Условия обеспечения и приемы повышения устойчивости дуги переменного тока

Обеспечение устойчивости дуги переменного тока проанализируем последовательно с помощью следующих уравнений:

$$\begin{aligned}\Theta_d - R_{мэ}C_{вн} &> 0; \\ U_{2m}\sin\varphi - U_3 &> 0; \\ \rho_d - \rho_n &> 0.\end{aligned}\tag{5.9}$$

Первое условие (динамической устойчивости, по определению автора работы [7]), предусматривает сохранение межэлектродного промежутка в ионизированном состоянии в течение преддугового интервала. В этом уравнении постоянная времени дуги Θ_d представляет собой отношение энергии межэлектродного промежутка $Q_{мэ}$ к средней мощности тепловых потерь $W_{пот}$ из него и отображает собой длительность снижения энергии до нуля: $\Theta_d = Q_{мэ}/W_{пот}$ [с]. Порядок постоянной времени Θ_d в сварочных дугах $10^{-7} \dots 10^{-3}$ с [7, 48, 70].

Произведение $R_{мэ}C_{вн}$ представляет собой постоянную времени электрической цепи, шунтирующей дугу. Эта цепь состоит из межэлектродного промежутка с начальным сопротивлением $R_{мэ}$ и внешней по отношению к трансформатору цепи с емкостью $C_{вн}$. В реальных сварочных цепях в состав $C_{вн}$ входят только очень маленькие емкость сварочных проводов и «паразитная» емкость межвитковой изоляции обмоток трансформатора. Поэтому порядок $R_{мэ}C_{вн}$ — $10^{-8} \dots 10^{-6}$ с. Следовательно, выполнение первого условия достижимо приемами воздействия на составляющие этого уравнения.

Технологические приемы повышения устойчивости дуги переменного тока физически мотивированы выполнением первого условия:

— увеличение энергии $Q_{мэ}$ и уменьшение сопротивления $R_{мэ}$ за счет увеличения диаметра электрода и тока;

— уменьшение начальной температуры плазмы за счет введения в состав сварочных материалов легкоионизируемых компонентов (с низким потенциалом ионизации и низкой работой выхода электронов);

— уменьшение мощности потерь $W_{пот}$ благодаря использованию электродов с низкой теплопроводностью, ограничению обдува дуги газовыми потоками, сокращению длины дуги.

Второе условие (квазустойчивости, по определению авторов работы [48]) предписывает, чтобы в момент повторного зажигания (при $t = 0$) напряжение трансформатора превышало значение напряжения повторного зажигания ($U_{2m}\sin\varphi \geq U_3$). А достигается это сдвигом фазы тока относительно фазы напряжения трансформатора на угол φ с помощью катушки индуктивности (см. рис. 5.6, б). Кроме того, необходимо, чтобы непосредственно перед повторным зажиганием напряжение на катушке достигло амплитудного значения ($U_{Lm} \geq U_3$).

Технологические приемы повышения устойчивости по второму условию, направленные на снижение U_3 , совпадают с приведенными выше для выполнения первого условия (увеличение энергии $Q_{мэ}$ и уменьшение потерь $W_{пот}$). Фактически напряжение U_3 является электрической характеристикой пригодности сварочных материалов и технологии для сварки на переменном токе (покрытие, защитная среда, режим).

Электротехнические приемы повышения устойчивости, связанные с выполнением второго условия:

- увеличение вторичного напряжения трансформатора U_2 (или напряжения холостого хода U_x);

- увеличение индуктивности L катушки (или индуктивности рассеяния трансформатора), приводящее к сдвигу фаз до угла φ , достаточного для обеспечения непрерывного сварочного тока;

- предупреждение насыщения и снижение вихревых токов в магнитопроводе трансформатора, затрудняющих нарастание сварочного тока при переходе через нуль.

Электротехнические приемы, связанные с использованием других устройств для ускорения или усиления действия источника:

- увеличение частоты переменного тока f , что приводит к ускорению роста напряжения и более быстрому повторному зажиганию (индукторный генератор переменного тока с частотой 250–1000 Гц, инверторный источник с выходом переменного тока частотой 20–100 кГц);

- последовательное включение конденсатора в цепь трансформатора (см. разд. 5.4);

- включение параллельно трансформатору импульсного стабилизатора горения дуги (см. разд. 5.5 и 5.6).

- параллельное со вторичной обмоткой тиристорного трансформатора включение маломощного подпитывающего трансформатора или высоковольтного импульсного трансформатора [24].

Третье условие (статической устойчивости) распространяется на процессы относительно большой длительности ($> 10^{-2}$ с) и анализируется по соотношению наклонов ρ_d и ρ_n статических характеристик дуги и источника так же, как для дуги постоянного тока (разд. 4.3).

5.3.3 Электрические характеристики источника переменного тока для обеспечения устойчивости

Вышеприведенные параметры трансформатора и в целом сварочной цепи, оказывающие наиболее значительное влияние на устойчивость, могут считаться косвенными критериями устойчивости процесса сварки на переменном токе. Большинство из этих критериев такие же, как для систем питания постоянным током (разд. 4.3 и 4.4), но отличаются от них числовыми значениями. Это — напряжение холостого хода

трансформатора U_x , индуктивность сварочной цепи L , тип и наклон ρ_i внешней характеристики. Специфическими критериями для трансформаторов являются только ЭДС $E_{вих}$ и длительность $t_{вих}$ действия вихревых токов в их магнитопроводах.

Напряжение холостого хода U_x — косвенный критерий устойчивости, значение которого стремятся увеличить именно для обеспечения благоприятного характера протекания повторного зажигания и угасания дуги переменного тока. Типичные его значения для ручной сварки 45–80 В действующего значения. Максимальная величина 80 В ограничена требованиями безопасности по ГОСТ 60974-1-2012 для трансформаторов производственного назначения. Минимальная величина 45 В предлагается для того, чтобы включить в число допускаемых к использованию хотя бы некоторые трансформаторы, предназначенные для работы в средах с повышенной электрической опасностью, для которых максимальным по этому же ГОСТу является 48 В. Для автоматической сварки под флюсом максимально допустимо $U_x = 141$ В.

Расчетное значение минимально допустимого U_x получают при совместном обеспечении как надежного повторного зажигания дуги (5.7), так и длительного горения дуги перед угасанием (5.8):

$$U_x \geq \sqrt{\frac{4U_3^2 + \pi^2 U_d^2}{8}}. \quad (5.10)$$

Рассчитаем необходимое напряжение трансформатора для конкретных условий и режимов ручной сварки. Из работы [9] примем экспериментальные значения характеристик дуги: для электрода УОНИ 13/45 с основным покрытием диаметром 5 мм при токе $I_d = 220$ А и напряжении $U_d = 27$ В. Напряжение повторного зажигания в полупериоде обратной полярности (среднее значение $U_{з,ср}$ со среднеквадратическим отклонением σ_u) — 50 и ± 7 В. Для расчета примем значение $U_{з,расч} = U_{з,ср} + 3\sigma_u$, чтобы обеспечить высокую вероятность повторного зажигания (более 99,7 % по «правилу 3 σ » при нормальном распределении Гаусса). Тогда $U_{з,расч} = 71$ В. Подобным образом, если $U_{д,ср} = 27$ В, а $\sigma_u = \pm 3$ В, то расчетное значение напряжения $U_{д,расч} = 36$ В. Поэтому из (5.10) действующее значение $U_x = 64$ В. Это согласуется с технологическими рекомендациями на электроды УОНИ, при использовании которых трансформатор должен иметь напряжение холостого хода не ниже 70 В.

Более точная методика определения напряжения холостого хода с учетом также и активного сопротивления трансформатора приведена в работах [54, 74].

Полезно решить и обратную задачу — рассчитать допустимое по условию устойчивости значение напряжения дуги U_d при известном напряжении холостого хода трансформатора U_x . Если ввести коэффициент превышения напряжения повторного зажигания над напряжением дуги $m = U_x/U_d$, то из (5.10)

$$U_d \leq U_x \sqrt{\frac{8}{4m^2 + \pi^2}}. \quad (5.11)$$

Из уравнения следует, что для электродов с рутиловым покрытием, у которых коэффициент $m = 1$, предельное напряжение дуги U_d должно быть не выше $0,54U_x$. Для электродов с основным (фтористо-кальциевым) покрытием, приняв $m = 3$, получаем предельное напряжение U_d не выше $0,42U_x$.

Индуктивность сварочной цепи вместе с индуктивностью рассеяния собственно трансформатора — другой косвенный критерий устойчивости дуги переменного тока. Из (5.6) достаточная для повторного зажигания индуктивность

$$L \geq \frac{U_x}{2\sqrt{2}\pi f I_2}. \quad (5.12)$$

Например, в типичных условиях ручной сварки электродами с рутиловым покрытием на токах от 50 до 300 А достаточна индуктивность трансформатора с увеличенным рассеянием L соответственно от 1 до 0,25 мГн. Но, разумеется, в практике проектирования сварочных трансформаторов индуктивность принимают по другому условию — обеспечения настройки сварочного тока, причем в данном случае условие (5.12) заведомо выполняется. Поэтому для трансформаторов с падающей характеристикой, сформированной за счет увеличенного магнитного рассеяния, оценка устойчивости по критерию индуктивности в большинстве случаев не имеет смысла.

ЭДС вихревых токов сварочного трансформатора — косвенный критерий, характеризующий влияние качества магнитопровода на повторное зажигание. Вихревые токи возникают в магнитопроводе трансформатора и считаются неизбежным злом. Они вызывают нагрев магнитопровода и снижение КПД трансформатора, а также ухудшают сварочные свойства. Для уменьшения вихревых токов используют тонколистовую холоднокатаную сталь, легированную большим количеством кремния, сокращают зазоры в магнитопроводе, устраняют стальную арматуру из поля действия магнитных потоков трансформатора.

ЭДС, индуцируемая во вторичной обмотке потоками, создаваемыми вихревыми токами, в переходном периоде вычитается из основного напряжения вторичной обмотки (рис. 5.7, а). Поэтому задерживается

появление на межэлектродном промежутке напряжения $u_2 = U_3$, достаточного для повторного зажигания дуги. Негативное влияние вихревых токов на повторное зажигание можно характеризовать амплитудой $E_{\text{вих}}$ и длительностью действия $t_{\text{вих}}$ этой ЭДС. Однако в условиях сварки непосредственное измерение этих величин не возможно из-за демпфирующего действия остаточной проводимости межэлектродного промежутка в переходном периоде повторного зажигания.

Поэтому сравнение динамических свойств трансформаторов предложено [7] выполнять методом физического (электрического) моделирования (рис. 5.7, б). Источником энергии здесь служит заряженная с помощью диода VD конденсаторная батарея C емкостью около 1000 мкФ и энергией в несколько десятков джоулей. Первичная обмотка исследуемого сварочного трансформатора T закорачивается, а на вторичную обмотку с помощью тиристорного ключа VS разряжается конденсаторная батарея. Кривая разрядного тока i_p имеет форму полусинусоиды, и поэтому обрыв тока, обеспечиваемый тиристором, воспроизводит в магнитопроводе и вторичной обмотке процессы, подобные протекающим при сварке (рис. 5.7, в). На кривой нарастания u_2 после обрыва тока наблюдается скачок напряжения и его замедленный спад, характеризующиеся значениями $E_{\text{вих}}$ и $t_{\text{вих}}$. Адекватность модели реальному процессу подтверждается совпадением формы графиков $u_2 = f(t)$ на рис. 5.7, а и в.

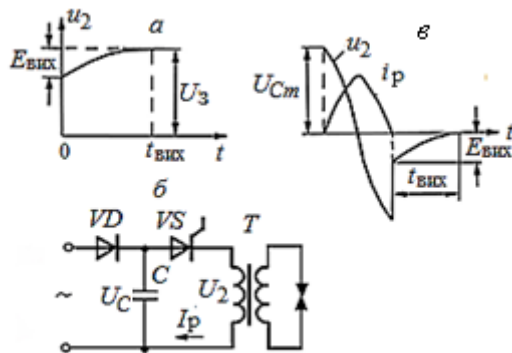


Рис. 5.7. К оценке вихревых токов сварочного трансформатора [7]

Пример оценки динамических свойств в сравнении нескольких сварочных трансформаторов для ручной сварки выполнен в работе [24]. В табл. 5.2 приведены результаты измерения ЭДС вихревых токов с помощью модели рис. 5.7, б. Поскольку масштабирование электрических величин для этой модели вызывает определенные трудности, результаты определения ЭДС вихревых токов приведены в относительных величинах $E_{\text{вих}}/U_{Cm}$, что для сравнения разных трансфор-

маторов и режимов вполне приемлемо. А длительность действия вихревых токов $t_{\text{вих}}$ в модели соответствует реальным значениям, поэтому приводится в абсолютных значениях [с]. В табл. 5.2 видно, что трансформаторы с подвижной вторичной обмоткой ТД-500 и с подвижным магнитным шунтом СТШ-500 имеют низкие динамические свойства. У них крепежные детали и элементы приводов, изготовленные из ферромагнитных материалов, размещены внутри контура магнитопровода, что и вызывает сильное развитие вихревых токов. Вихревые токи быстрее исчезают в трансформаторе установки УДГ-301 для аргонодуговой сварки, где в трансформаторе используется неподвижный шунт с электрическим управлением. Но наименьшие значения $E_{\text{вих}}$ и $t_{\text{вих}}$ имеет трансформатор ТСПП-200 с дросселем насыщения, обеспечивающий самую благоприятную трапецидальную форму кривой сварочного тока (см. рис. 6.5, д).

Таблица 5.2.

Характеристики вихревых токов при испытании сварочных трансформаторов

Критерий оценки	Режим	Марка трансформатора			
		ТД-500	СТШ-500	УДГ-301	ТСПП-200
ЭДС вихревых токов $E_{\text{вих}}/U_{Cm}$	Номинальный	0,35	0,39	0,21	0,12
	Минимальный	0,36	0,24	0,50	0,12
Длительность вихревых токов $t_{\text{вих}}, \text{с}$	Номинальный	0,24	0,24	0,12	0,06
	Минимальный	0,26	0,22	0,14	0,065

5.4. Включение конденсатора в сварочную цепь

В разд. 5.3 было установлено, что устойчивое горение дуги переменного тока достигается благодаря использованию катушки индуктивности в сварочной цепи. Но еще более эффективно вводить в сварочную цепь катушку и конденсатор одновременно (рис. 5.8, а).

Схематичные осциллограммы показаны на рис. 5.8, б. Если индуктивное сопротивление X_L больше емкостного сопротивления X_C , ток i_2 отстает от напряжения u_2 на угол φ . Баланс напряжений при повторном зажигании рассмотрим с учетом соотношения

$$U_{2m}\sin\varphi + U_{Cm} - U_s > 0. \quad (5.13)$$

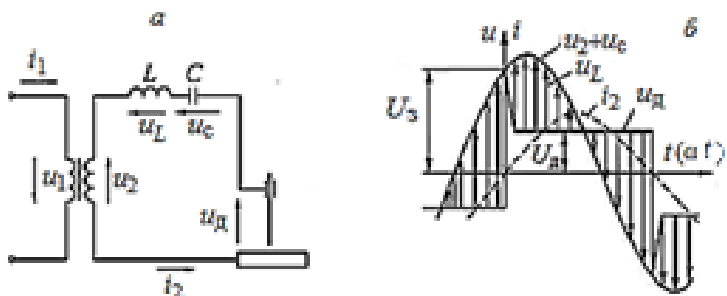


Рис. 5.8. Дуга переменного тока в цепи с катушкой индуктивности и конденсатором: а — схема, б — осциллограммы тока и напряжения (напряжение u_L показано линиями со стрелками)

Если сопоставить эту зависимость со вторым условием устойчивости (5.9) для цепи только с катушкой индуктивности, увидим, что подпитывающее действие конденсатора существенно повышает надежность повторного зажигания. Расчет показывает, что для электродов с рутиловым покрытием, у которых $U_3 \approx U_d$, напряжение дуги в цепи с катушкой индуктивности и конденсатором может достигать $0,82U_x$, тогда как в цепи с одной катушкой оно по уравнению (5.11) не может быть выше $0,54U_x$.

В работе [75] исследовали влияние последовательного включения конденсаторов в цепь стандартных источников на их сварочные свойства. Например, в исходном варианте использования трансформатора ТД-500 при настройке для сварки электродами АНО-4 диаметром 4 мм на токе 170 А разрывная длина дуги между двумя горизонтально расположенными электродами составила $l_{др} = 26$ мм. Но если последовательно в сварочную цепь включить конденсаторную батарею емкостью 10000 мкФ, то разрывная длина увеличится до 48 мм. И на других испытанных режимах устойчивость процесса, оцениваемая по разрывной длине, повышается в 1,5–2,5 раза.

Резонансные источники [50]. При близости значений индуктивного и емкостного сопротивлений наблюдается явление резонанса напряжения. В результате амплитудные значения напряжений U_{Ln} и U_{Cn} могут оказаться даже выше, чем амплитуда напряжения холостого хода трансформатора U_{2m} . А это приведет к существенному повышению устойчивости. Наибольший эффект с точки зрения повторного зажигания и устойчивости процесса сварки достигается при соотношении $X_L/X_C = 0,75$, т.е. вблизи резонанса, но с преобладанием емкостного сопротивления [76]. В этом случае непрерывное горение обеспечивается при $U_d < 1,16U_x$, т.е. даже при сварочном напряжении в 2 раза большем, чем при использовании только трансформатора с увеличенным рассеянием.

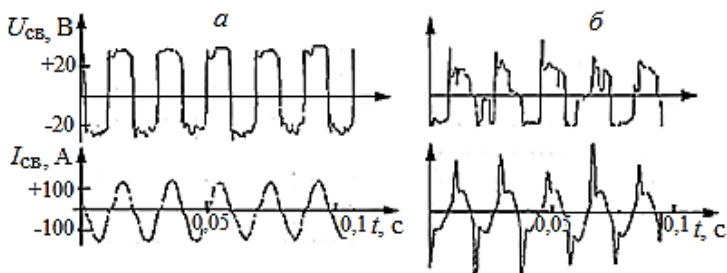


Рис. 5.9. Ручная сварка нормальной (а) и короткой (б) дугой с использованием резонансного источника (РСИ-153, электрод ОЗС-4 Ø3 мм, 100 А)

Пример оценки устойчивости при испытании резонансного источника показан на рис.5.9 и в табл. 5.3. Источник РСИ-153 предназначен для выполнения бытовых и ремонтно-монтажных работ, он весит всего 15 кг. Такое снижение массы достигается применением батареи электролитических конденсаторов максимальной емкостью 10000 мкФ. Трансформатор с ярмовым рассеянием и витковой настройкой режима имеет напряжение холостого хода всего от 34 до 42 В. С использованием высокотехнологичных электродов ОЗС с рутиловым покрытием источник обеспечивает приемлемую для бытовых трансформаторов устойчивость при сварке в нижнем положении ($n_{\text{обр}} = 0-2$ раз/эл), но недостаточную для сварки в вертикальном положении ($n_{\text{обр}} = 2-4$ раз/эл). Разрывная длина дуги относительно невелика ($l_{\text{др}} = 7-12$ мм), но при этом как раз укладывается в современные нормы — $l_{\text{др}} \approx 3d_{\text{э}}$.

Таблица 5.3.

Непосредственные критерии устойчивости для схемы с конденсатором (резонансный источник РСИ-153)

Диаметр электрода, мм		2	3	4
Марка электрода		ОЗС-12	ОЗС-4	
Установленный ток, А		60	100	125
Установленное напряжение холостого хода, В		34	41	41
Частота обрывов $n_{\text{обр}}$, раз/эл	нижнее положение	0	2	0
	вертикальное	4	4	2
Разрывная длина дуги $l_{\text{др}}$, мм		7	10	12
Скорость нарастания преддугового тока $(di_2/dt)_3$, кА/с		19	28	40
Относительная скорость нарастания тока $(di_2/dt)_3/(di_2/dt)_y$		0,51	0,50	0,53
Показатель $F = U_x \frac{(di_2/dt)_3}{(di_2/dt)_k}$, В		19	23	24

Расшифровка осциллограмм (рис. 5.9) объясняет такой результат. Конденсаторная батарея способствует быстрому росту тока при повторном зажигании — $(di_2/dt)_3 = 19-40$ кА/с, а поэтому и устойчивому процессу в нормальных

условиях. Но при значительном удлинении дуги сказывается низкое напряжение холостого хода — как на разрывной длине, так и на сварке вертикального шва.

Интересно также отметить своеобразие процессов при попытке сварки чрезмерно короткой дугой длиной 1–2 мм (рис. 5.9, б). Если смена полярности происходит при коротком замыкании электрода на ванну, то мощный разряд конденсаторной батареи быстро восстанавливает дугу. Это также способствует устойчивости процесса. Важно отметить, что показатель F не применим для оценки устойчивости процесса у резонансного источника (выделено в табл. 5.3 жирным шрифтом). Дело в том, что входящая в показатель величина U_x не отражает истинное значение напряжения источника $u_2 + u_c$, участвующее в процессе повторного зажигания.

5.5. Импульсная стабилизация при сварке плавящимся электродом

Импульсный стабилизатор горения дуги (ИСГД) представляет собой вспомогательный источник, питающий дугу кратковременными импульсами повышенного напряжения для стимулирования повторных зажиганий. Теория сварочных источников с ИСГД детально обоснована в монографии [54]. Здесь обсудим только некоторые ее аспекты, связанные с обеспечением устойчивости.

Принцип генерирования стабилизирующих импульсов поясним на примере стабилизатора СД-3 (рис. 5.10). Основными частями ИСГД являются трансформатор T , коммутирующий конденсатор C и тиристорный ключ $VS1$ – $VS2$ с блоком управления A . ИСГД подключен к дуге параллельно основному источнику — сварочному трансформатору G .

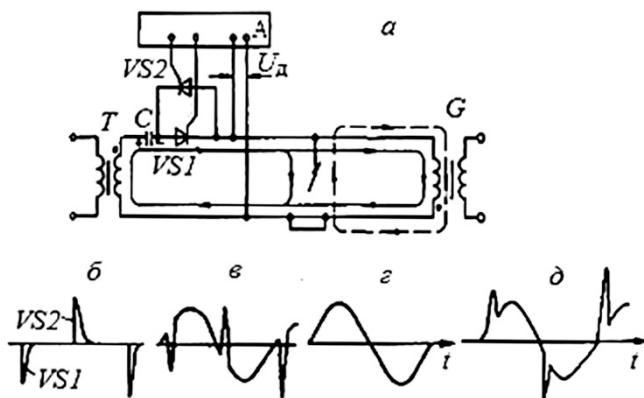


Рис. 5.10. Импульсный стабилизатор СД-3 (а) и карта его напряжений (б–д)

В начале первого полупериода по сигналу от блока управления открывается тиристор $VS1$. В результате по цепи, показанной тонкой линией

со стрелками, и следовательно, по межэлектродному промежутку проходит первый стабилизирующий импульс тока (рис. 5.10, *а*). При этом согласно действующие ЭДС трансформаторов *T* и *G* заряжают конденсатор напряжением с полярностью, указанной на рисунке (+ и –). В результате полной зарядки конденсатора он запрет тиристор *VS1* (коммутирует тиристорный ключ). Во втором полупериоде открывается тиристор *VS2*, и ток второго, более мощного импульса (благодаря суммированию ЭДС трансформаторов *T* и *G* с напряжением разряда конденсатора *C*) проходит по межэлектродному промежутку в противоположном направлении. Такой резонансный характер перезарядки конденсатора *C* позволяет получить на межэлектродном промежутке стабилизирующие импульсы напряжения с амплитудой до 200 В (рис. 5.10, *б*) при сравнительно низком напряжении трансформатора *T* около 40 В. Частота генерирования импульсов 100 Гц, их энергия — 0,2–1 Дж. На межэлектродный промежуток подается также напряжение от основного источника *G* (рис. 5.10, *з*). На рис. 5.10, *в* показано напряжение, получаемое при совместном действии стабилизатора и основного источника. Повторное зажигание происходит в момент подачи стабилизирующего импульса, обычно время повторного зажигания не превышает 0,3 мс.

При указанной на рис. 5.10, *а* фазировке трансформаторов *T* и *G* полярности напряжений, подаваемых на межэлектродный промежуток от основного источника и от стабилизатора, противоположны (встречное включение). Согласное включение получится при смене фазировки трансформатора *G* или стабилизатора (рис. 5.10, *д*). На рис. 5.10, *а* видно, что при встречном включении часть импульсного тока, проходящая по вторичной обмотке *G* (тонкая линия), совпадает по направлению с собственным током этой обмотки (штриховая линия) и поэтому не препятствует быстрому нарастанию ее тока до необходимой для повторного зажигания величины. Размеры и масса стабилизатора со встречным включением меньше, а диапазон стабилизируемого сварочного тока шире в сравнении со стабилизатором согласного включения.

Для синхронизации запуска ИСГД с фазами работы сварочного трансформатора в блоке управления *A* используется обратная связь по напряжению дуги U_d . После перехода напряжения через нуль стабилизатор с небольшой заданной задержкой подаст импульс на дугу. В отличие от автономных встроенный стабилизатор может запускаться с помощью двойного управления — не только за счет обратной связи по напряжению, но еще и по току. Это повышает надежность его работы, в частности предотвращает ложные срабатывания при технологических коротких замыканиях.

Автономный стабилизатор СД-3 может использоваться с любым трансформатором для ручной сварки с напряжением холостого хода не ниже 60 В. Более эффективно использование стабилизаторов, встроен-

ных в корпус трансформатора. При этом стало возможным снижение напряжения холостого хода трансформатора до 45 В. А это в свою очередь снизило потребляемый из сети ток и массу трансформатора.

Непосредственные критерии импульсной стабилизации — это напряжение $U_{ис}$, ток $I_{ис}$ и длительность $t_{ис}$ импульса, а также время задержки подачи импульса $t_{зи}$. Напряжение $U_{ис}$ назначают не ниже напряжения повторного зажигания U_3 . Ток $I_{ис}$ и длительность $t_{ис}$ должны быть такими, чтобы на спаде импульса суммарный ток стабилизатора и трансформатора в провале не упал ниже тока повторного зажигания I_3 (см. рис. 3.13). Поэтому длительность импульса $t_{ис}$ должна превышать время нарастания тока трансформатора до значения I_3 . Например, при использовании большинства марок электродов такой преддуговой ток $I_3 = 5$ А. При типичной индуктивности сварочной цепи 0,1–0,5 мГн этот ток достигается соответственно через 70–30 мкс после перехода через нуль. Такой и должна быть минимальная длительность высоковольтного разряда $t_{ис}$, чтобы он без перерыва переходил в установившуюся дугу [78]. При недостаточной энергии импульса необходимо задержать его подачу на время $t_{зи} = 80–90$ мкс [29].

Иногда импульс характеризуют комплексным параметром — энергией импульса $A_{ис} = \int U_{ис} I_{ис} dt$ или косвенным критерием — энергией заряда конденсатора $A_{зар} = C_{зар} U_{зар}^2 / 2$. Последняя характеристика близка к энергии импульса по физическому смыслу, но больше ее из-за неполного разряда конденсатора и потерь энергии в разрядном контуре.

Типичные значения параметров импульса при ручной сварке покрытыми электродами: энергия $A_{ис} = 0,05–1$ Дж, амплитуда напряжения $U_{ис} = 50–300$ В, амплитуда тока $I_{ис} = 50–300$ А при длительности $t_{ис}$ не менее 0,07 мс, задержка подачи импульса $t_{зи} = 0,05–0,3$ мс.

Пример оценки устойчивости был выполнен с применением трансформатора ТДМ-402 и нескольких стабилизаторов. (табл. 5.4).

Таблица 5.4.

Устойчивость процесса с импульсной стабилизацией при ручной сварке (трансформатор ТДМ-402, электрод УОНИ 13/55)

Критерий оценки	Режим сварки	Без ИСГД	СДИ	SGD-4	УСГД
Частота обрывов дуги $n_{обр}$, раз/эл	Электрод Ø3 мм, $U_x = 75$ В, 70 А, 22 В	>10	0	0,3	3
	Электрод Ø4 мм, $U_x = 56$ В, 190 А, 22 В	>10	0	0	–
Разрывная длина дуги $l_{др}$, мм	Электрод Ø3 мм	3	13	11	10
	Электрод Ø4 мм	7	11	10	–

Параметры стабилизирующих импульсов	Напряжение $U_{ис}$, В	—	50–190		70–200
	Ток $I_{ис}$, А		80–170		80–300
	Длительность $t_{ис}$, мс	—	0,2–0,3		0,15–0,3
	Время задержки $t_{зи}$, мс	—	1–2		0,15–1

Примечания:

- ТДМ-402 (1 диапазон — $U_x = 75$ В, 70–230 А, 2 диапазон — $U_x = 56$ В, 215–400 А);
- встроенный стабилизатор СДИ ($U_{пит} = 36$ В, $C_{зар} = 10$ мкФ);
- автономный стабилизатор *SGD-4* ($A_{зар} = 0,35$ Дж);
- встроенный стабилизатор УСГД ($U_{пит} = 100$ В, $C_{зар} = 6,8$ мкФ).

Условия сварки искусственно затруднены: использовались электроды УОНИ 13/55 с большим содержанием CaF_2 в покрытии, ограниченно пригодные для сварки на переменном токе; режимы с пониженным током, соответствующим началу диапазона настройки трансформатора, или с пониженным напряжением холостого хода

В исходном варианте сварки без ИСГД процесс неустойчив. После многократных попыток зажигания дуга сохраняется в течение не более 5 с, но затем обрывается, что вынуждает сварщика к новым попыткам зажигания. Картина радикально меняется при включении любого ИСГД. При использовании стабилизатора СДИ обрывы дуги прекращаются на обоих режимах. Стабилизаторы *SGD-4* и УСГД обеспечивают удовлетворительный результат — 0–3 обрыва на один электрод. Более дифференцированным критерием устойчивости является разрывная длина дуги $l_{др}$, определяемая при ее горении в штативе. В сравнении с экспериментом без ИСГД, где $l_{др}$, равная 3–7 мм, недопустимо мала, дуга с любым стабилизатором растягивается до $l_{др} = 10$ –13 мм, т.е. ее длина составляет (2,5–4) d_3 . Ранжирование стабилизаторов по разрывной длине такое же, как и по частоте обрывов (СДИ, *SGD-4*, УСГД), но разница между ними невелика.

Полезно также проанализировать осциллограммы наиболее успешного стабилизатора СДИ, при просмотре которых не отмечено ни одного недопустимого нарушения процесса. Видно, что при сварке короткой дугой (рис. 5.11, а) повторные зажигания происходят при $t_3 = 0,18$ –0,32 мс в основном самопроизвольно, т.е. еще до появления стабилизирующего импульса. Напротив, при сварке длинной дугой (рис. 5.11, б) повторное зажигание возможно только с помощью стабилизирующего импульса, причем до появления импульса вообще нет сварочного тока (горизонтальные участки на кривой тока).

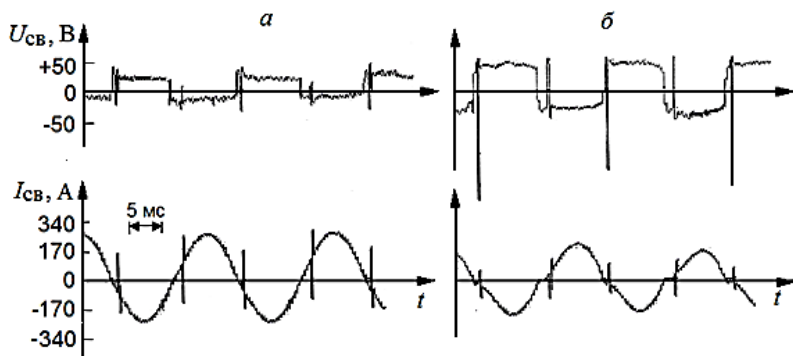


Рис. 5.11. Сварка с импульсной стабилизацией: а — 215 А, 23 В, $l_0 = 3$ мм; б — 160 А, 32 В, $l_0 = 8$ мм (трансформатор ТДМ-402, начало 2 диапазона + стабилизатор СДИ, электрод УОНИ 13/55 Ø4 мм)

Необходимость задержки импульса заслуживает специального анализа. Время задержки $t_{\text{зи}}$ подачи импульса по литературным рекомендациям [54] составляет 0,06–0,2 мс. Но на экспериментальной модели УСГД при варьировании $t_{\text{зи}}$ от 0,1 до 1 мс оценка устойчивости одинаково высока как по частоте обрывов, так и по разрывной длине. А наилучшие результаты оценки по этим непосредственным критериям получены, вопреки ожиданиям, у стабилизатора СДИ с явно чрезмерным $t_{\text{зи}} = 1\text{--}2$ мс. Таким образом, в установившемся процессе ручной сварки величина $t_{\text{зи}}$ не является критичным параметром. Анализ осциллограмм позволил уточнить роль стабилизатора при ручной сварке покрытыми электродами. Наибольшую помощь ИСГД оказывает при начальном зажигании (см. разд. 3.1), а в установившемся процессе вступает в действие только при значительных возмущениях, например, по длине дуги.

5.6. Устойчивость процесса аргонодуговой сварки на переменном токе

Дуга переменного тока обладает важными технологическими достоинствами при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом алюминия и его сплавов. В полупериоды обратной полярности (+ на вольфрамовом электроде) идет очистка подлежащей сварке поверхности алюминиевого изделия за счет эффекта катодного распыления оксидной пленки. А в полупериоды прямой полярности (– на электроде) происходит более интенсивное проплавление алюминиевого изделия с менее значительным нагревом электрода.

Развитие физических процессов, сопровождающих аргонодуговую сварку на переменном токе, изучено в работе [70]. На рис. 5.12 построены графики изменения электрических, тепловых и геометрических характеристик дуги в течение полного периода переменного тока. Все

графики имеют циклический характер с частотой 100 Гц и скачками вблизи перехода тока через нуль, особенно резкими при смене полярности дуги с прямой на обратную.

В переходных интервалах (при $t \approx 0,01$ с, $0,02$ с и т.д.) плотность тока в столбе у торца электрода j_k снижается до нуля, почти так же резко меняется и концентрация n , заряженных частиц — электронов — в межэлектродном промежутке, приблизительно в 2 раза уменьшается площадь поперечного сечения дуги S_d и ее температура $T_{мз}$ (точнее, степень почернения пленки, используемой при киносъемке дуги), и на порядок возрастает сопротивление межэлектродного промежутка $R_{мз}$ — до нескольких ом. Этот скачок сопротивления, а также деионизация межэлектродного промежутка и являются главными причинами затруднений в повторном зажигании дуги. Такой скачок вызывает резкое увеличение напряжения повторного зажигания в начале полупериода обратной полярности, характерное именно для аргонодуговой сварки алюминия вольфрамовым электродом.

Детальный анализ физических процессов, сопровождающих сварку на переменном токе, выполнен в работе [7]. Здесь объясняются явления электронной эмиссии с катода, развития тлеющего разряда и перехода его в дуговой, в том числе с учетом окисленности поверхности изделия, состава защитного газа и других физических условий.

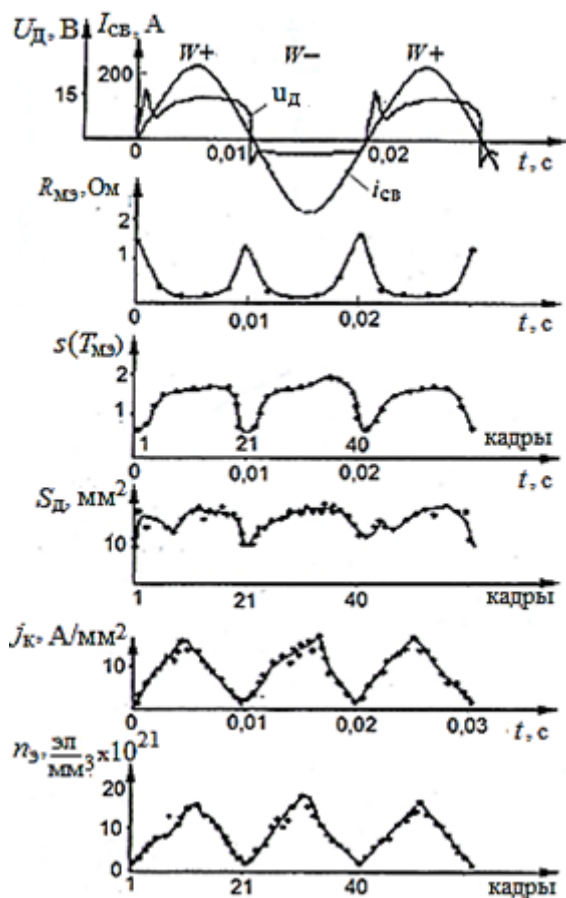


Рис. 5.12. Физические характеристики процесса при аргонодуговой сварке алюминия на переменном токе (электрод ЭВЛ Ø3 мм, 150 А, 13 В)

Современные представления об явлении катодной очистки поверхности окисленных алюминиевых изделий изложены в работе [77] в виде трех механизмов:

- наиболее вероятным по-прежнему считается механизм распыления оксидной пленки в результате бомбардировки поверхности катода относительно тяжелыми положительно заряженными ионами аргона;

- по второй гипотезе катодное распыление может быть последствием т.н. диэлектрического пробоя, при котором ионы из дуги под действием мощного электрического поля проникают в межзаточное пространство катода и вызывают в нем многочисленные столкновения,

приводящие к разрушению поверхностного оксидного слоя изнутри;

— по третьей гипотезе мельчайшие катодные пятна, характерные для относительно легкоплавкого алюминия, быстро и хаотически перемещаясь по изделию, оставляют за собой пятнистую поверхность с выходом наружу оплавленных неокисленных участков чистого алюминия.

Электрические процессы при аргонодуговой сварке алюминия на переменном токе для оценки устойчивости изучают с помощью осциллограмм тока и напряжения (рис. 5.13, а). Для объяснения закономерностей протекания электрических процессов необходимо учитывать различие физических свойств тугоплавкого вольфрамового электрода и сравнительно легкоплавкого изделия из алюминия. В полупериоде прямой полярности, когда катодом является нагретый выше 4000 К вольфрамовый электрод, мощная термоэлектронная эмиссия обеспечивает значительный ток $i_{пр}$ и интенсивное плавление металла изделия. Напряжение зажигания при прямой полярности почти равно напряжению устойчиво горящей дуги $u_{пр}$, которое при короткой дуге может составлять всего 8–10 В.

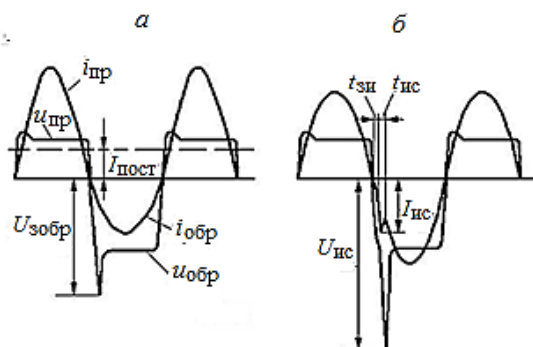


Рис. 5.13. Схематичные осциллограммы дуги переменного тока без вспомогательных устройств (а) и с ними (б)

В начале полупериода обратной полярности термоэлектронная эмиссия со сравнительно холодного катода — алюминиевого изделия и ванны — ничтожно мала, поэтому здесь основным механизмом зажигания считают автоэлектронную эмиссию. Но она требует очень большого напряжения повторного зажигания $U_{з.обр}$ — до 200 В. Поэтому сварка алюминиевых сплавов на переменном токе стандартной частоты при безопасном напряжении (менее 80 В) затруднена. И для успешной сварки обязательно использование импульсного стабилизатора, именно в полупериоде обратной полярности. Напряжение установившегося горения дуги обратной полярности $u_{обр}$ больше, чем в полупериоде прямой полярности, оно превышает 15 В.

Ток обратной полярности $i_{\text{обр}}$ на 20–50 % ниже по сравнению с током прямой полярности $i_{\text{пр}}$. Таким образом, в кривой сварочного тока возникает постоянная составляющая $I_{\text{пост}}$. Для облегчения условий работы сварочного трансформатора подавление постоянной составляющей (ликвидация или уменьшение) выполняется специальным устройством. На рис. 5.13, б показаны осциллограммы тока и напряжения при наличии импульсного стабилизатора и устройства ликвидации постоянной составляющей тока.

Требования к конструкции и параметрам основного источника, обычно трансформатора, с целью повышения устойчивости сформулированы в работах [7, 33, 70].

1) Повышенное напряжение холостого хода. Если учесть из [70] возможные при аргонодуговой сварке на малых токах значения напряжения повторного зажигания дуги обратной полярности $U_{\text{з.обр}}=100$ В и напряжения устойчивого горения дуги $U_{\text{д.обр}}=30$ В, то в соответствии с уравнением (5.10) должно быть напряжение холостого хода $U_{\text{x}} \geq 78$ В. Это значение оказывается вблизи величины, предельно допустимой по требованиям безопасности в ГОСТ 60974-1-2012 для ручной сварки — $U_{\text{x}} \leq 80$ В действующего значения. Но в менее благоприятных условиях аргонодуговой сварки, и особенно при использовании в качестве защитного газа гелия, напряжение повторного зажигания может достигать значения $U_{\text{з.обр}} = 200\text{--}220$ В [33]. Тогда в соответствии с уравнением (5.10) напряжение холостого хода должно быть не менее 145 В. Напомним, что даже при автоматической сварке в случае использования полностью изолированной горелки и устройства ограничения длительности работы источника после сварки временем 1 с допускается напряжение холостого хода $U_{\text{x}} \leq 141$ В.

2) Повышенная частота переменного тока. В современных инверторных источниках на промежуточной стадии преобразования получается переменный ток с высокой частотой 20–100 кГц. Экспериментом установлено, что на такой частоте процесс аргонодуговой сварки идет устойчиво даже без использования импульсного стабилизатора. Универсальным по роду тока может быть также и вентильный генератор. С его внешних зажимов питают дугу постоянного тока. Но если к нему добавить зажимы на промежуточной стадии преобразования энергии — от индукторного генератора переменного тока с частотой 250–1000 Гц, то становится возможной и сварка алюминия.

3) Увеличение скорости нарастания напряжения и тока в полупериоде обратной полярности традиционными методами сводится к устранению насыщения магнитопровода сварочного трансформатора, а также к использованию подмагничиваемых дросселей и трансформаторов с трапецидальной формой тока. При скорости $di_2/dt > 9,5$ кА/с ста-

новится возможным процесс на малых токах с помощью импульсного стабилизатора, а при скорости более 200 кА/с — даже без стабилизатора [70].

4) Источник разнополярных импульсов — современное радикальное решение сразу нескольких технологических проблем при сварке алюминия, в том числе и устойчивости (подробней в разд. 10.4.5). Более высокая устойчивость процесса в сравнении со сваркой на переменном токе объясняется очень высокой скоростью роста напряжения источника, а поэтому и сварочного тока в начале каждого такта (до 500–800 кА/с [212]).

Требования к конструкции и параметрам импульсного стабилизатора для аргодуговой сварки сформулированы в работах [12, 35, 78, 212].

1) Предпочтителен ИСГД, встроенный в корпус основного источника — сварочного трансформатора. В сравнении с автономным ИСГД здесь проще обеспечить согласование его параметров с параметрами трансформатора, их защиту друг от друга фильтрами и правильную фазировку стабилизирующего импульса. С основным источником ИСГД может соединяться параллельно или последовательно, в последнем случае повышается степень разряда накопительного конденсатора и снижаются масса и размеры ИСГД. ИСГД рационально совмещать с возбудителем.

2) ИСГД с частотой следования импульсов 50 Гц должен быть согласован с основным трансформатором включения — с одинаковой полярностью стабилизирующего импульса и фазы напряжения трансформатора, соответствующей обратной полярности дуги. Стабилизатор с частотой 50 Гц стимулирует зажигание дуги только обратной полярности, с частотой 100 Гц — дуги и обратной, и прямой полярности.

3) Параметры импульсов: энергия импульса в дуге $A_{ис} = 0,2–1$ Дж, амплитуда напряжения $U_{ис} = 50–200$ В (при холостом ходе — до 600 В), амплитуда тока $I_{ис} = 20–150$ А при длительности $t_{ис}$ не менее 0,06 мс. При ограниченной мощности стабилизатора его включение следует задерживать относительно момента перехода тока через нуль на $t_{зи} = 0,06–0,2$ мс — время, необходимое на переход от тлеющего разряда к дуговому.

Требования к конструкции и параметрам устройства подавления постоянной составляющей сварочного тока.

1) В источниках переменного синусоидального тока подавление постоянной составляющей осуществляется за счет фазового управления с помощью регулятора, состоящего из двух встречно-параллельно включенных тиристоров [24]. Поскольку полная ликвидация постоянной составляющей обычно необязательна, то регулятор может выполнять еще и функцию «баланс» распределения энергии между полупериодами прямой и обратной полярности — проплавление–очистка.

2) У современных источников разнополярных импульсов проблема защиты трансформатора от постоянной составляющей обычно не стоит. Поэтому назначенный только по технологическим требованиям ток в такте прямой полярности может превышать ток обратной полярности до 4 раз. Таким же может быть и соотношение между длительностями тактов при одинаковом токе в этих тактах.

Пример оценки устойчивости дуги переменного тока с импульсной стабилизацией при аргодуговой сварке был выполнен на том же оборудовании и по той же методике, как и при сварке покрытыми электродами (см. разд. 5.5). В табл. 5.5 отражены результаты эксперимента в широком диапазоне режимов, в том числе в наиболее неблагоприятных условиях — при минимальном токе трансформатора (начало 1 диапазона — 65 А) и минимальном напряжении (начало 2 диапазона — $U_x = 56$ В, 170 А). Видно, что устойчивость по непосредственному критерию — частоте обрывов — высока на всех режимах у обоих стабилизаторов, кроме самого низкого режима (65 А), где она только удовлетворительна — 1 обрыв за 10 с сварки. Эластичность дуги высока на всех режимах. Действительно, непосредственный критерий ее оценки — разрывная длина дуги — составляет от 17 до 26 мм, что по крайней мере втрое превышает рекомендуемую при сварке длину дуги. И другой критерий эластичности — напряжение обрыва $U_{об} = 23\text{--}31$ В — в 1,5 раза превышает типичное сварочное напряжение.

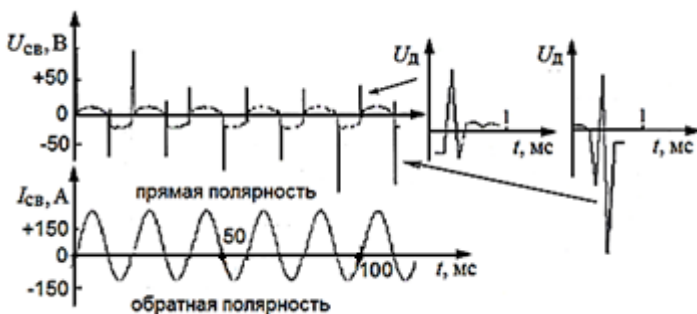


Рис. 5.14. Аргодуговая сварка с импульсной стабилизацией (ТДМ-402 + стабилизатор SGD-4, сплав АМгб, электрод ЭВЛ Ø4 мм, 170 А, 18 В)

Проанализируем характер электрических процессов с помощью осциллограмм тока и напряжения (рис. 5.14). В установившемся процессе кривая сварочного тока имеет синусоидальный вид без обрывов и коротких замыканий. Наблюдается ее сдвиг вверх в сторону преобладания полупериода прямой полярности — постоянная составляющая тока достигает 32 % от действующего значения переменного тока (на других режимах 30–50 %). Кривая сварочного напряжения также несимметрична — среднее значение напряжения в полупериоде прямой полярности $U_{пр} = 14$ В, а обратной полярности — $U_{обр} = 22$ В. Стабилизирующие импульсы генерируются с абсолютной регулярностью в начале каждого полупериода с частотой 100 Гц.

Параметры стабилизирующих импульсов на рис. 5.14 следующие. Ампли-

тудное напряжение импульсов прямой полярности 40–90 В, обратной — 80–130 В, длительность импульса прямой полярности 0,2 мс, обратной — 0,3 мс, время задержки импульса прямой и обратной полярности 0,6–1,0 мс. Названные непосредственные критерии, определявшиеся с помощью осциллограмм на этом и всех других режимах (табл. 5.5), тоже соответствуют рекомендуемым значениям. Правда, некоторые измеренные значения времени задержки $t_{зи} = 0,6–1,2$ мс не совпадают с литературными рекомендациями, что, впрочем, не приводит к снижению устойчивости, положительно оцениваемой по иным критериям.

Таблица 5.5.

*Устойчивость процесса с импульсной стабилизацией
при аргонодуговой сварке алюминия (трансформатор ТДМ-402)*

Стабилизатор	СДИ			SGD-4		
Диаметр электрода, мм	2	4	6	2	4	6
Сварочный ток, А	65	170	240	65	170	240
Напряжение дуги, В	17	18	19	17	18	19
Расход газа, л/мин	5	7	9	5	7	9
Частота обрывов дуги $n_{обр}$, раз/10 с	1	0	0	1	0	0
Разрывная длина дуги $l_{др}$, мм	–	25	21	17	26	26
Напряжение обрыва дуги $U_{об}$, В	26	31	27	23	27	28
Напряжение импульса $U_{ис}$, В*	120 /100	100-120 /90-100	–	150–170 /120	100–170 /40–90	–
Длительность импульса $t_{ис}$, мс*	0,3 /0,2	0,3 /0,2-0,3	–	0,3 /0,2–0,4	0,3 /0,2	
Время задержки импульса $t_{зи}$, мс*	0,3 /0,3	0,3 /0,6	–	0,15–0,2 /0,3–0,6	0,3–1.2 /0.6–1.2	

*полярность полупериода обратная/прямая

6. СТАБИЛЬНОСТЬ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА

6.1. Понятие стабильности режима

6.1.1. Основные параметры режима дуговой сварки

Сначала выделим параметры, подлежащие оперативному контролю на стабильность в процессе сварки. Это — сварочный ток $I_{\text{св}}$, сварочное напряжение $U_{\text{св}}$, длина дуги $l_{\text{д}}$, скорость подачи электродной проволоки $V_{\text{под}}$, скорость сварки $V_{\text{св}}$, расход защитного газа $Q_{\text{г}}$ и вылет электродной проволоки из токоподвода $l_{\text{в}}$. Остальные параметры, такие как диаметр электрода (или проволоки), род тока и полярность дуги, пространственное положение шва, форма и размеры разделки, величина зазора между заготовками, обычно остаются неизменными в ходе сварки. Во всяком случае, их стабильность не связана с характеристиками сварочного оборудования, поэтому здесь не анализируется.

Стабильность энергетических параметров режима — тока и напряжения — имеет смысл оценивать, если в системе «источник–дуга» обеспечена устойчивость в заданном диапазоне режимов. Отклонения тока от заданного или среднего значения сказываются на глубине проплавления. Отклонения сварочного напряжения вызывают пропорциональные изменения ширины шва.

Стабильность длины дуги может оцениваться по стабильности напряжения, поскольку между ними существует пропорциональная зависимость:

$$U_{\text{д}} = U_{\text{ка}} + \varepsilon_{\text{ст}} I_{\text{д}}.$$

В некоторых случаях, особенно при сварке с технологическими короткими замыканиями, следует отличать напряжение дуги $U_{\text{д}}$ от комплексного сварочного напряжения $U_{\text{св}}$, в котором учитывается еще и напряжение короткого замыкания каплями электродного металла $U_{\text{кк}}$:

$$U_{\text{св}} = \frac{\sum U_{\text{д}} t_{\text{д}} + \sum U_{\text{кк}} t_{\text{кк}}}{\sum t_{\text{д}} + \sum t_{\text{кк}}}$$

Это же касается и тока, поскольку при сварке с короткими замыканиями ток дуги $I_{\text{д}}$ меньше усредненного за полное время сварочного тока $I_{\text{св}}$:

$$I_{\text{св}} = \frac{\sum I_{\text{д}} t_{\text{д}} + \sum I_{\text{кк}} t_{\text{кк}}}{\sum t_{\text{д}} + \sum t_{\text{кк}}}.$$

Стабильность скорости подачи электродной проволоки, например, в системе АРДС, способствует стабильности тока, поскольку ток при этом самоуставливается в зависимости от скорости подачи —

$$I_{\text{св}} = \frac{0,78 V_{\text{под}} \gamma d^2}{\alpha_p}$$

Скорость сварки условно можно также отнести к энергетическим параметрам, поскольку ее изменения тоже влияют на погонную энергию процесса, как изменения тока и напряжения —

$$q = I_{\text{св}} U_{\text{св}} / V_{\text{св}}.$$

6.1.2. Возмущения, нарушающие стабильность параметров режима

Виды возмущений сварочного процесса приведем в порядке, приблизительно соответствующем их распространенности и значимости:

- по длине дуги, поскольку она сильнее других параметров влияет на величину напряжения и тока, а также на устойчивость процесса;
- по напряжению сети, особенно в связи с его влиянием на напряжение холостого хода источника;
- по скорости подачи электродной (или присадочной) проволоки;
- по скорости сварки;
- по вылету электрода из токоподводящего наконечника;
- по расходу защитного газа.

Технологические возмущения, связанные с некачественной подготовкой и сборкой заготовок под сварку (неравномерный скос кромок, неравномерный зазор, смещение кромок и др.), часто являются основной причиной недопустимых изменений формы и размеров шва и появления дефектов. Но они не связаны со стабильностью параметров режима и редко компенсируются изменением характеристик сварочного оборудования, поэтому в данном разделе не рассматриваются.

Характер возмущений, нарушающих стабильность параметров режима, во времени бывает периодическим, линейным, импульсным и скачкообразным (рис. 6.1). Наиболее распространенные из них по порядку увеличения длительности:

- периодические колебания с частотой до 200 кГц неполностью сглаженного тока источников с промежуточной стадией высокочастотного преобразования (инвертор, чоппер, индукторный генератор) повышают устойчивость процесса и вызывают звук, слышимый при частоте менее 20 кГц;

- периодические флуктуации проводимости дуги, вызванные хаотическими движениями катодного и анодного пятен по торцу электрода и поверхности сварочной ванны, приводят к высокочастотным (200–

2000 Гц) колебаниям тока (кривая 1), практически не оказывающим воздействия на устойчивость процесса, но влияющим на звучание дуги;

— периодические колебания напряжения источника с частотой сети 50 Гц (или кратной ей частотой 100, 150, 300 Гц) вызывают пропорциональные колебания тока (кривая 2), обычно не отражающиеся на форме шва, но способные повлиять на перенос электродного металла;

— импульсные всплески тока с частотой 1–200 Гц (кривая 3) при отрыве капель, и особенно при технологических коротких замыканиях также не вызывают изменения глубины проплавления из-за большой тепловой инерции сварочной ванны, хотя такой характер изменения тока связан с характером переноса;

— периодические колебания тока с частотой менее 1 Гц, возникающие, например, при манипуляциях электрододержателем или горелкой со стороны сварщика, могут вызвать такие же периодические изменения глубины проплавления и искажения формы шва;

— импульсные отклонения тока длительностью более 1 с, вызванные, например, кратковременными заеданиями или проскальзываниями проволоки, могут привести к непроварам или, наоборот, к прожогам;

— скачкообразные отклонения тока (кривая 4), например, по причине бросков напряжения сети, имеющих длительный характер, также приводят к серьезным дефектам формы шва, если возмущение не отрабатывается энергетической системой или системой управления.

Результатом названных возмущений являются отклонения тока от установившегося значения $I_{ду}$, например динамическая ошибка регулирования $\Delta I_{дин} = I_{дмах} - I_{ду}$ и статическая ошибка $\Delta I_{стат} = I_{ду1} - I_{ду}$.

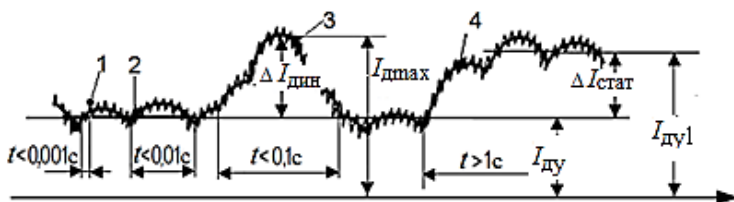


Рис. 6.1. Схематичная осциллограмма тока при сварке с типичными возмущениями

6.1.3. Средства измерения сварочного тока и напряжения

Современные средства для статических и динамических измерений сварочного тока и напряжения — это аналоговые и цифровые электроизмерительные приборы, цифровые осциллографы и регистраторы [79].

Аналоговые показывающие приборы — стрелочные амперметр и вольтметр (рис. 6.2) — будучи сравнительно простыми электромехани-

ческими устройствами, все еще широко используются при испытании сварочного оборудования. Именно поэтому при их выборе для конкретного испытания необходимо учитывать следующие метрологические характеристики.

1) Система электромеханического преобразования сигнала измеряемой величины принимается в зависимости от рода тока. При сварке на постоянном токе используются приборы магнитоэлектрической системы. При этом учитывается тот факт, что из-за большой механической инерции отсчетного устройства его показания пропорциональны среднеарифметическому значению сварочного тока или напряжения. В работе [80] экспериментально доказано, что для измерения тока, пульсирующего в естественных условиях сварки, например, в процессе с технологическими короткими замыканиями, следует применять именно такие приборы. Так, при вычислении мощности дуги перемножение среднеарифметических значений тока и напряжения в сравнении с прямым измерением мощности обеспечивает точность не хуже 5 %. А перемножение среднеквадратических значений тока и напряжения может привести к погрешности по мощности до 20 %.

Как известно, приборы электромагнитной системы традиционно предназначаются для измерения параметров переменного тока, так как их показания пропорциональны среднеквадратическому значению измеряемого сигнала. Но поскольку тепловыделение в дуге пропорционально не квадрату, а только первой степени тока (если не учитывать тепловыделение в вылете электрода), то при сварке на переменном токе полезно пользование приборами выпрямительной системы. Она фактически является усовершенствованием магнитоэлектрической системы. Так, например, многопредельные амперметры выпрямительной системы представляют собой сочетание шунтов, полупроводниковых одно- или двухполупериодных выпрямителей и магнитоэлектрического микроамперметра. Подробности методики и аппаратура для измерения искаженного переменного тока при сварке алюминия описаны в работе [70].

2) Класс точности при испытании сварочного оборудования принимается не хуже 1.0 [20]. Этому требованию отвечают приборы лабораторного типа. Щитовые приборы при этом применять нельзя.

3) Пределы измерения сварочного тока и напряжения при выборе и настройке прибора принимаются так, чтобы возможные результаты измерений приходились на интервал 20–95 % шкалы прибора. Для расширения пределов измерения постоянного тока используют измерительные шунты RS на ток 15, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 500, 1000 А и милливольтметры $mV (PA)$ на напряжение 75 мВ (рис. 6.2). Для расширения пределов измерения переменного тока включают трансформаторы тока TA с параметрами 15, 50, 100, 150, 200, 300, 500, 600, 1000 А/5 А и ампермет-

ры PA на 5 А. Для измерения сварочного напряжения обычно используется прямое включение вольтметра PV на дугу или выходные зажимы источника. Но при высоком напряжении холостого хода может использоваться добавочное сопротивление или делитель напряжения. А при использовании высоковольтных осцилляторов или импульсных стабилизаторов GI вольтметр отделяется от дуги LC -фильтром.

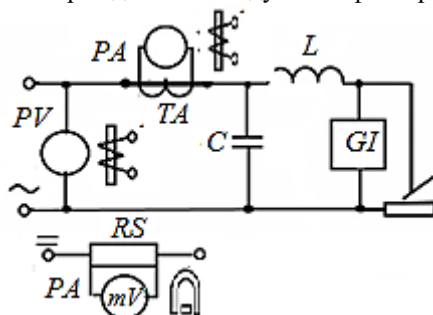


Рис. 6.2. Включение показывающих измерительных приборов при испытании сварочного оборудования переменного (\sim) и постоянного ($=$) тока

4) Быстродействие аналоговых приборов ограничивается их инерционностью, которую принято характеризовать временем успокоения механических частей. У лабораторных приборов классов точности 0,5 и 1,0 оно не превышает 4 с. Безусловно, такая медлительность измерительного прибора является недостатком. Но если сблизить характеристики быстродействия прибора и сварочной ванны, то измеренные колебания сварочного тока и напряжения окажутся пропорциональными колебаниям соответственно глубины и ширины ванны — как в статике, так и в динамике. Поэтому показания этих приборов и особенно их броски могут послужить предварительными сигналами о стабильности размеров шва.

Цифровые показывающие приборы представляют результат измерения в дискретной (цифровой) форме в отличие от непрерывного сигнала в аналоговых приборах. В цифровом приборе сигнал измеряемой величины поэтапно:

- принимает во входном устройстве унифицированную форму постоянного напряжения (например, от -5 В до $+5$ В) в результате пропорционального ослабления, усиления, выпрямления и т.д.;

- принимает в аналого-цифровом преобразователе АЦП форму двоичного кода;

- передается в регистр для временного хранения;

- поступает в световой индикатор для представления результата измерения в десятичной форме.

В современных цифровых приборах, а также при их встраивании в систему управления сварочного оборудования используется микроконтроллер, который придает прибору дополнительные возможности:

- в его постоянном запоминающем устройстве (ПЗУ) хранятся программы обработки информации;

- в его оперативном запоминающем устройстве (ОЗУ) хранятся промежуточные результаты измерений;

- с его помощью выполняется периодическая выдача на индикатор усредненных значений сварочного тока и/или напряжения с частотой 0,2–0,5 Гц, комфортной для человеческого восприятия (поскольку длительность тепловых переходных процессов в ванне пропорциональна величине тока, полезно интервал $t_{\text{изм}}$ усреднения измеряемого тока согласовать с величиной этого тока, например, по соотношению $t_{\text{изм}} = (0,005–0,01) I_{\text{св}}$).

Метрологическими характеристиками цифрового прибора являются:

- 1) Разрядность АЦП n , т.е. количество двоичных символов (0 и 1) в коде числа, преобразованного в АЦП.

- 2) Длина шкалы 2^n , которая характеризует число возможных уровней преобразования в АЦП и равна максимальному десятичному числу, отображаемому двоичным кодом в старшем разряде АЦП (так $2^8 = 256$).

- 3) Разрешающая способность $1/2^n$, обратная длине шкалы и характеризующая чувствительность прибора и точность измерения (например, 0,4 % при $n = 8$).

- 4) Частота дискретизации, т.е. количество циклов преобразования или количество отсчетов измеряемой величины в секунду, характеризующая быстродействие прибора и способность к контролю высокочастотных изменений сварочного тока и напряжения (имеет порядок МГц).

- 5) Разрядность индикации, т.е. количество десятичных цифр на индикаторе (у 4-разрядного индикатора максимальное отображаемое число 9999, а для сварочного тока с учетом знака + 999 А или – 999 А).

Цифровые регистрирующие приборы — запоминающие осциллографы и специализированные сварочные регистраторы — используются для динамических измерений параметров сварочных процессов. В этой области они полностью вытеснили пишущие и печатающие приборы (самописцы). Существенно сузилась и область применения электронно-лучевых осциллографов. Принцип действия и порядок применения цифровых регистрирующих приборов пояснены в разд. 11.3.

Для оценки стабильности параметров цифровой регистратор предоставляет широкие возможности выбора масштаба развертки и фильтрации сигнала. На рис. 6.3, а приведена запись, выполненная с высокой скоростью — с шагом дискретизации 0,4 мс. При количе-

стве точек на одно деление экрана 25 цена деления — 10 мс/дел. В этом масштабе удастся выявить частоту выпрямления — 300 Гц, а также коэффициент пульсации тока, вызванной тиристорным регулированием — 0,18.

В масштабе 25 мс/дел (рис. 6.3, б) удобно анализировать длительность переноса каплей электродного металла, поскольку пульсации выпрямления при этом сглаживаются фильтром, а пики технологических коротких замыканий отчетливо проявляются. А на рис. 6.3, в при масштабе 250 мс/дел можно определить частоту таких коротких замыканий при большом количестве пиков тока на одной записи. И, наконец, при шаге дискретизации 40 мс и масштабе 1 с/дел (рис. 6.3, г) могут проявиться колебания тока и напряжения, неизбежные при ручном поддержании дуги, при длительности которых более 1–4 с происходит изменение размеров шва.

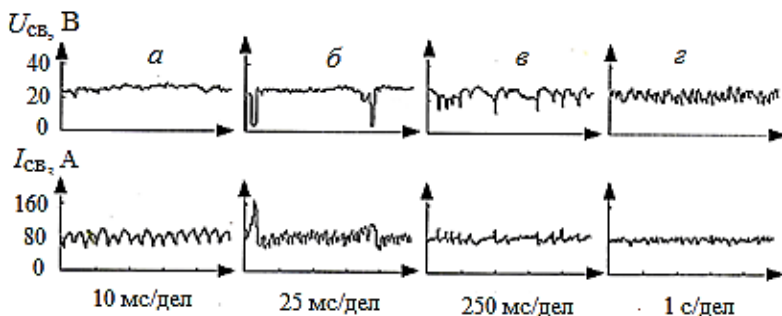


Рис. 6.3. Осциллограммы тока и напряжения с различным масштабом временной развертки (выпрямитель ВДУ-306МТ, электрод УОНИ 13/55 Ø2,5 мм, 80 А, осциллограф GDS-802S)

Массив результатов многократных измерений, зафиксированных цифровым регистратором в течение полного времени сварки, может быть представлен в координатах $I_{св}-U_{св}$ (рис. 6.4, а).

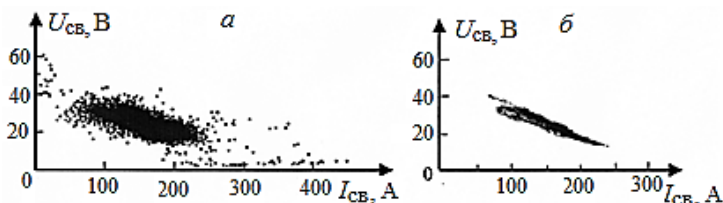


Рис. 6.4. Рабочее поле режима ручной сварки: а — полный массив измерений, б — отфильтрованные значения. [81]

Как видно, рабочее поле при сварке одним электродом охватывает широкий интервал событий от холостого хода ($U_x = 61$ В) до

короткого замыкания ($I_{\text{кп}} = 438 \text{ А}$). Точки, отображающие дуговой разряд, располагаются более плотно, сливаясь вблизи от настроенных значений ($I_{\text{св}} = 160 \text{ А}$, $U_{\text{св}} = 23 \text{ В}$). В целом сварочный процесс характеризуется большим разбросом параметров. Такой процесс считается случайным и должен описываться методами теории вероятностей. Например, при использовании программного фильтра с частотой среза 50 Гц (рис. 6.4, б) из массива измеренных результатов исключаются события продолжительностью менее 20 мс, т.е. капельный перенос и пульсации выпрямленного напряжения. Это позволяет изучать дуговой процесс в чистом виде, т.е. с исключением непродолжительных интервалов обрывов и технологических коротких замыканий.

6.2. Критерии стабильности режима

6.2.1. Непосредственные критерии стабильности

Предельные значения параметра режима — простейший непосредственный критерий стабильности, получаемый при небольшом количестве наблюдений ($n < 15$) с помощью показывающих приборов. Например, при расплавлении одного электрода рекомендуется после установления процесса сделать 10–14 отсчетов с одинаковыми интервалами между ними в 3–10 с. Перед началом эксперимента необходимо принять меры к устранению или существенному снижению систематических, в том числе инструментальных, погрешностей измерений, а из списка результатов исключить грубые выбросы или два крайние значения. Предлагается для характеристики стабильности режима ограничиться указанием только минимального, максимального и среднего значений, а запись результата измерений вести по форме $\frac{I_{\text{свmin}} \dots I_{\text{свmax}}}{I_{\text{св.ср}}}$.

Можно также характеризовать стабильность параметра режима его предельными отклонениями от среднего значения в одном процессе сварки — типа $\Delta I_{\text{св}} = I_{\text{свmax}} - I_{\text{св.ср}}$, или $\Delta I_{\text{св}} = I_{\text{свmin}} - I_{\text{св.ср}}$, или $\pm \Delta I_{\text{св}} = (I_{\text{свmax}} - I_{\text{свmin}})/2$.

Относительные отклонения параметра от среднего значения — более универсальный критерий стабильности, поскольку позволяет сравнивать источники разных типов и мощности и на разных режимах. Обычно его вычисляют по соотношению вида $\pm \frac{\Delta I_{\text{св}}}{I_{\text{св.ср}}}$ или $\pm \frac{\Delta I_{\text{св}}}{I_{\text{св.ср}}} 100 \%$.

Пример оценки стабильности тока и напряжения при ручной сварке в сравнении для источников разных типов приведен в табл. 6.1. У конвенциональных источников (трансформатор ТДМ-401 и агрегат АДД-4004М) монотонно падающие внешние характеристики. Поэтому у них при сварке в благоприятных условиях нижнего пространственного положения относительные отклонения тока, зафиксированные с помощью аналоговых амперметров, составили

Таблица 6.1.

*Непосредственные и косвенные критерии
стабильности тока и напряжения при ручной сварке*

Источник	Трансформатор ТДМ-401				Агрегат АДД-4004М с венти- льным генератором ГД-4006М				
Простран- ственное положение	Нижнее		Верти- кальное		Нижнее			Вертикаль- ное	
Диаметр электрода, мм	3	5	3	4	3	4	5	3	4
Марка электрода	ОЗС-4				УОНИ 13/55				
Установ- ленный ток, А	100	200	90	135	100	150	200	90	130
Предельные значения сварочного тока, А	95 105	185 210	85 95	125 145	90 105	135 160	185 220	80 100	120 140
Относи- тельное отклонение тока $\pm \Delta I_{\text{св}}/I_{\text{св.ср}}$, %	5	6	6	7	7	8	9	11	7
Предельные значения сварочного напряже- ния, В	17– 23	19– 25	20– 28	20– 26	18– 27	22– 32	23– 35	19– 32	22– 34
Относите- льное отк- лонение напряжения $\pm \Delta U_{\text{св}}/U_{\text{св.ср}}$, %	15	14	17	13	20	17	21	25	21
Наклон внешней характери- стики $\rho_{\text{и}}$, В/А	– 1,2	– 0,4	– 1,5	– 0,8	– 2,4	– 1,7	– 1,4	– 2,7	– 1,8

Таблица 6.1. (продолжение)

*Непосредственные и косвенные критерии
стабильности тока и напряжения при ручной сварке*

Источник	Тиристорный выпрямитель ВДУ-506МТ							
Пространственное положение	Нижнее					Вертикальное		
Диаметр электрода, мм	2	3	4	5	6	2	3	4
Марка электрода	ОЗС-12	УОНИ 13/55		ТМЛ-1У	ОЗС-4	ОЗС-12	УОНИ 13/55	
Установленный ток, А	60	100	150	200	300	50	80	120
Предельные значения сварочного тока, А	58–62	98–103	147–152	198–203	296–303	47–52	76–85	115–125
Относительное отклонение тока $\pm \Delta I_{св}/I_{св.ср.}, \%$	3	2	2	1	1	5	6	4
Предельные значения сварочного напряжения, В	20–24	20–26	20–25	21–27	21–26	21–27	18–26	19–25
Относительное отклонение напряжения $\pm \Delta U_{св}/U_{св.ср.}, \%$	9	13	11	12	11	12	18	14
Наклон внешней характеристики $\rho_n, В/А$	– ∞ (на основном вертикальном участке комбинированной ВАХ)							

от 5 до 9 %. Как уже отмечалось, указанные отклонения тока могут привести к пропорциональным изменениям глубины проплавления, здесь не превышающим 9 %. Поэтому с точки зрения формирования шва такую стабильность тока можно считать удовлетворительной. При сварке вертикального шва снизу вверх характеристики стабильности хуже, отклонения тока от 6 до 11 %. Тем не менее,

такая стабильность может считаться условно приемлемой, потому что техникой сварки на вертикали предусмотрен периодический характер ручного управления сварочной ванной для предотвращения ее стекания. У современного тиристорного выпрямителя ВДУ-506МТ с фазовым электрическим управлением и вертикальным основным участком внешней характеристики критерии стабильности существенно лучше — отклонения тока от 1 до 6 %.

Стабильность сварочного напряжения для тех же источников и режимов намного хуже — отклонения от 9 до 25 %. Но они вызываются преимущественно колебаниями длины дуги и зависят от квалификации и старательности сварщика, а также от особенностей техники сварки. Таким образом, стабильность напряжения при ручной сварке не может использоваться для оценки источника, и поэтому далее не обсуждается.

Статистические критерии стабильности – среднеарифметическое значение, среднеквадратическое отклонение и доверительный интервал случайной погрешности — определяются по методике ГОСТ ГСИ 8.207–76 [82]. Поскольку по метрологической классификации большинство параметров сварочного режима являются случайными величинами, точность результата измерений повышают увеличением количества отсчетов одной и той же величины. ГОСТ регламентирует процедуру математической обработки массива таких измерений при количестве наблюдений $n \geq 15$. Заметим, что при автоматической регистрации параметров режима сварки количество точечных или интервальных отсчетов исчисляется сотнями и тысячами. По ГОСТ 8.207-76 рекомендуется следующий порядок измерительных и вычислительных операций:

— предотвращают появление систематических погрешностей и исключают из массива измеренных значений грубые выбросы;

— вычисляют среднеарифметическое значение по формуле вида

$$I_{\text{св.ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n I_{\text{св}i}}{n} \quad (6.1)$$

— вычисляют среднеквадратическое отклонение по формуле вида

$$\sigma_I = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_{\text{св}i} - I_{\text{св.ср}})^2}{(n-1)}}. \quad (6.2)$$

— оценивают соответствие распределения нормальному закону по специальным критериям [82, 83, 200] (для механизированной и автоматической сварки на постоянном токе без технологических коротких замыканий это суждение можно считать истинным априорно);

— вычисляют доверительный интервал случайной погрешности при нормальном распределении по формуле вида

$$\Delta_I = \frac{k_c \cdot \sigma_I}{\sqrt{n}}.$$

(при доверительной вероятности $P_{\text{дов}} = 0,95$ и $n \geq 15$ можно принять коэффициент Стьюдента постоянным – $k_c = 2$);

— результаты обработки измерений приводят в виде $I_{\text{св.ср}} \pm \Delta_I$, $P_{\text{дов}}$ с одинаковой разрядностью чисел $I_{\text{св.ср}}$ и Δ_I (если по умолчанию $P_{\text{дов}} = 0,95$, то запись может иметь вид $83,6 \pm 4,3$ А).

Среднеквадратическое отклонение — самый распространенный критерий для оценки стабильности энергетических параметров режима — сварочного тока и напряжения [84].

Коэффициент вариации параметра k_v — относительный непосредственный критерий стабильности параметра. Например, коэффициент вариации сварочного тока

$$k_{vI_{\text{св}}} = \frac{\sigma_I}{I_{\text{св.ср}}}. \quad (6.3)$$

Как относительная величина он более удобен для сопоставления различных источников и режимов по их стабильности [84].

Коэффициент нестабильности процесса сварки γ , комплексный непосредственный критерий, предложен в работе [234] для оценки стабильности (или нестабильности) энергетических параметров режима при механизированной сварке плавящимся электродом:

$$\gamma = (k_{vU_d} + k_{vI_d})\Sigma t_d/T_{\text{св}} + (k_{vU_{\text{кк}}} + k_{vI_{\text{кк}}})\Sigma t_{\text{кк}}/T_{\text{св}} + N_{\text{об}} \Sigma t_{\text{об}}/T_{\text{св}}$$

Для его определения выполняют технологический эксперимент, который сопровождается автоматической регистрацией сварочного тока и напряжения по отдельности в интервалах горения дуги t_d , технологических коротких замыканий $t_{\text{кк}}$ и обрывов дуги $t_{\text{об}}$. Частота измерений должна иметь порядок десятков кГц (шаг дискретизации не более 0,1 мс). Непосредственные критерии — коэффициенты вариации тока и напряжения — вычисляются отдельно в интервалах горения дуги k_{vI_d} и k_{vU_d} и в интервалах коротких замыканий $k_{vI_{\text{кк}}}$ и $k_{vU_{\text{кк}}}$. Критерием обрывов дуги как более редким и гораздо более опасным нарушением принято абсолютное (а не относительное как k_v) количество обрывов $N_{\text{об}}$ в течение полного времени сварки. Значимость каждого критерия представляет собой отношение суммы длительностей горения, замыканий и обрывов к полному времени сварки $T_{\text{св}}$ ($\Sigma t_d/T_{\text{св}} + \Sigma t_{\text{кк}}/T_{\text{св}} + \Sigma t_{\text{об}}/T_{\text{св}} = 1$).

Покажем пример вычисления коэффициента нестабильности при механизированной наплавке самозащитной порошковой проволокой (ПП-АН130-1, 2 мм, 256 А, 22 В):

$$\gamma = (0,15 + 0,37) \times 0,908 + (0,44 + 0,33) \times 0,089 + 3 \times 0,0025 = 0,472 + 0,068 + 0,008 = 0,548$$

Как видно, при механизированной сварке главную роль в характеристике стабильности играют показатели интервалов горения дуги, в меньшей степени интервалов коротких замыканий, и совсем незначительно интервалов обрывов. Но в зависимости от характера переноса роли отдельных интервалов могут и поменяться. На других режимах в этом же эксперименте получены значения γ от 0,32 (высокая стабильность при переносе без коротких замыканий и обрывов) до 1,78 (низкая стабильность, усугубляемая большим количеством обрывов – $N_{обр} = 21$ за $T_{св} = 44$ с).

Пример оценки стабильности процесса механизированной сварки (табл. 6.2) приведен в работе [85]. Сравнивались три источника:

— тиристорный выпрямитель ВД-506ДК с системой жесткого программного управления переносом (ВКЗ);

— инверторный источник *Invertec* с гибким программным управлением импульсами источника (*STT*);

— инверторный источник *Trans Puls Synergic 3200* с импульсной подачей проволоки (*CMT*) на устойчивом режиме с базовым током 120 А и неустойчивом — с базовым током 70 А.

Таблица 6.2.

Непосредственные критерии стабильности параметров режима при механизированной сварке с управляемым переносом электродного металла (активные защитные газы, проволока Св-08Г2С Ø1,2 мм, $V_{св} = 0,5$ м/мин, $V_{под} = 3,2\text{--}3,3$ м/мин, кроме CMT)

Диапазон частот	Коэффициент вариации	Источник			
		ВД-506ДК	<i>Invertec STT</i>	<i>Trans Puls Synergic 3200 CMT</i>	
				$I_6=120\text{A}$	$I_6=70\text{ A}$
ВЧ	напряжения $k_{vU_{св}}$	0,42	0,35	0,40	–
СЧ	частоты КЗ k_{vfkK}	0,12	0,09	–	–
	длительности КЗ k_{vfkK}	0,24	0,21	–	–
	тока КЗ k_{vfkK}	0,08	0,08	–	–
НЧ	тока дуги k_{vId}	0,11	0,12	0,13	0,38
	мощности дуги k_{vPd}	0,16	0,15	0,15	0,40
	глубины проплавления k_{vjz}	0,10	0,13	0,12	0,38
	ширины шва $k_{vс}$	0,17	0,16	0,14	0,40

Осциллограммы тока, напряжения и мощности подвергались статистической обработке с помощью программы «СтатСвар 1.0». Сначала сигнал делился по трем диапазонам: высокой частоты — 500–5000 Гц, средней — 0–500 Гц и

низкой — 0–10 Гц. Затем в разных диапазонах вычислялись значения критериев стабильности отдельных параметров режима, в том числе коэффициенты вариации. В диапазоне низких частот (НЧ) полезно оценивать стабильность тока и мощности; средних частот (СЧ) — определять параметры частоты и длительности технологических коротких замыканий, характеризующих перенос электродного металла; высоких частот (ВЧ) — выделять хаотические флуктуации напряжения. Из данных табл. 6.2 следует, что у названных современных источников на оптимальных режимах стабильность всех параметров высокая — коэффициенты вариации от 0,09 до 0,24. Исключением является только показатель стабильности напряжения в диапазоне высоких частот — $k_{v\text{вд}} = 0,35\text{--}0,42$. Но этот параметр характеризует только высокочастотные хаотические перемещения активных пятен дуги по поверхности электрода и ванны и не имеет отношения к устойчивости процесса или стабильности геометрии шва.

Визуально обнаруживаемый, заведомо неустойчивый из-за низкого базового тока процесс (правый столбец) характеризуется чрезмерно большими коэффициентами вариации — от 0,38 до 0,40. Это дополнительно подтверждает правильность выбора коэффициентов вариации в качестве непосредственных критериев стабильности параметров режима.

В табл. 6.2 приведены также критерии стабильности глубины проплавления и ширины шва. Установлены факты хорошей корреляции геометрических характеристик шва с электрическими параметрами режима. Действительно, коэффициенты вариации тока $k_{v\text{вд}}$ в интервалах горения дуги, т.е. вне интервалов коротких замыканий, близки к таким же характеристикам глубины проплавления (коэффициент взаимной корреляции 0,95) — факт прямой пропорциональной зависимости глубины от тока при механизированной сварке общеизвестен. Но вывод о тесной связи ширины шва с мощностью дуги менее очевидный, и поэтому более полезный.

6.2.2. Косвенные критерии стабильности

Напомним, что косвенными критериями будем считать такие электрические характеристики оборудования, которые оказывают наиболее значительное влияние на непосредственные критерии стабильности.

Наклон вольт-амперной характеристики источника $\rho_{\text{и}} \approx \Delta U_{\text{и}}/\Delta I_{\text{д}}$ — косвенный критерий стабильности тока или напряжения. Так, жесткая внешняя характеристика гарантирует высокую стабильность сварочного напряжения. Жесткой по ГОСТ 60974-1-2012 называют характеристику, у которой $\rho_{\text{и}} = -0,07\ldots +0,1$ В/А. Это означает, например, что если некоторое возмущение вызвало увеличение тока на 10 А, то оно же приведет к отклонению напряжения на $-0,7\ldots+1$ В. Это касается и основного жесткого участка комбинированной характеристики источника для механизированной сварки (см. рис. 4.28). В англоязычной технической документации жесткая внешняя характеристика обозначается аббревиатурой *CV* (*constant voltage*), т.е. стабильное напряжение.

В случае же падающей характеристики гарантируется высокая стабильность тока. По ГОСТ 60974-1-2012 падающей называют характеристику с наклоном круче $\rho_n = -0,07$ В/А. Это означает, что если возмущение вызвало увеличение напряжения на 1 В, ток при этом снизился не более 14 А. В англоязычной документации источник с падающей характеристикой обозначается *CC (constant current)*, т.е. стабильный ток.

Отклонения напряжения холостого хода источника от расчетного или установленного значения — косвенный критерий, величина которого влияет на сварочный ток и напряжение. Имеется в виду не абсолютное значение U_x , а именно интервал его колебаний, в пределах которого оценка стабильности оказывается удовлетворительной. Границы этого интервала зависят от конструкции источника, а в современном источнике — от наличия в его системе управления функции стабилизации U_x . Например, сварочный цех, который по категории качества электропитания относится к группе III, снабжается энергией с колебаниями сетевого напряжения не более +5 и – 10 %. Примерно такие же допустимые отклонения U_x гарантирует и сварочный источник без устройств стабилизации. Но современный, например, тиристорный выпрямитель с МП-системой управления ограничивает колебания U_x в пределах 0... – 3 %.

Отклонения частоты вращения двигателя в приводе подачи электродной проволоки от установленного значения — косвенный критерий, значения которого в системе АРДС влияют в основном на сварочный ток (см. разд. 6.5).

6.3. Регулярные пульсации сварочного тока и напряжения

Здесь рассмотрены только нарушения и пульсации энергетических параметров, органически присущие конкретным типам источников, поскольку объясняются их устройством и принципом действия.

6.3.1. Переменный сварочный ток

Переменный ток, как правило, является вторичным током сварочного трансформатора. Он имеет форму, близкую к синусоиде, и частоту 50 Гц (в странах Америки — в основном 60 Гц). Здесь рассматриваются только отклонения от правильной синусоидальной формы тока. Кривую сварочного тока принято характеризовать следующими критериями [24]:

— коэффициент амплитуды $k_{aI} = I_{2m}/I_2$, т.е. отношение амплитудного значения тока к его действующему (среднеквадратическому) значению (для неискаженной синусоиды $k_{aI} = 1,41$);

— коэффициент формы $k_{fI} = I_2/I_{2cp}$, т.е. отношение действующего значения к среднему (для неискаженной синусоиды $k_{fI} = 1,11$);

— коэффициент нелинейности дуги $k_{нл} = \rho_d/R_d$, т.е. отношение дифференциального сопротивления дуги dU_d/dI_d к ее статическому со-

противлению U_d/I_d (предложен в работе [70] для оценки изменения характера разряда при переходе тока через нуль, порядок $k_{нл} = 0,1-2$).

Сварочные свойства источника переменного тока повышаются в случае снижения коэффициента амплитуды $k_{а.}$. Например, для аргонодуговой сварки алюминия на токе 200 А при снижении $k_{а.}$ от 1,73 (искаженная синусоида) к 1,41 (неискаженная синусоида) и до 1 (прямоугольные разнополярные импульсы) напряжение повторного зажигания в полупериоде обратной полярности $U_{з.обр}$ последовательно снижается — 30–17–14 В [70]. А снижение напряжения $U_{з.обр}$ является верным признаком повышения устойчивости процесса и стабильности тока.

Рассмотрим несколько примеров искажения синусоидальной формы кривой переменного сварочного тока (рис. 6.5).

1) Органически присущие дуговой сварке искажения вызываются нелинейным характером нагрузки — сварочной дуги (рис. 6.5, а). С учетом индуктивности сварочной цепи из (5.6) график изменения тока выражается уравнением

$$i_2 = \frac{U_{2m}}{\omega L} \sin(\omega t + \varphi - \frac{\pi}{2}) + \frac{U_d}{\omega L} (\frac{\pi}{2} - \omega t).$$

Поэтому ток дуги медленно нарастает после перехода через нуль и быстро падает перед следующим переходом. При этом коэффициент амплитуды увеличивается от 1,41 до 1,77 и более [70]. Искажение кривой тока менее значительно при короткой дуге и мощном режиме. Кроме того, медленное нарастание тока объясняется инерционным характером повторного зажигания с постепенным разогревом плазмы в межэлектродном промежутке. Приемы ускорения повторного зажигания были рассмотрены в разд. 5.3.

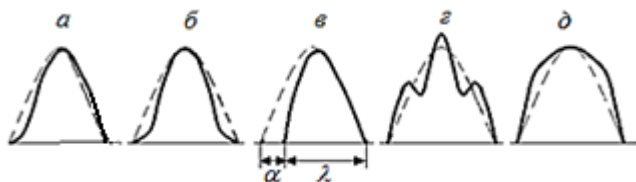


Рис. 6.5. Искажения формы переменного сварочного тока

2) В случае насыщения магнитопровода трансформатора существенно замедляется нарастание тока при его переходе через нуль, и дополнительно ухудшаются условия повторного зажигания (рис. 6.5, б). Для уменьшения искажений кривой тока рекомендуется выдерживать расчетные характеристики сечения и материала магнитопровода, обеспечивать качественную шихтовку магнитопровода с минимальными зазорами, использовать витые сердечники [54].

3) В тиристорных трансформаторах искажения тока вызываются самим принципом фазового регулирования, по которому сварочный ток настраивается изменением угла управления тиристора (рис. 6.5, в). С увеличением угла управления α уменьшается интервал проводимости $\lambda = \pi - \alpha$. При этом коэффициент формы возрастает по соотношению $k_{\phi I} = 1,11\sqrt{\pi/\lambda}$. В практически рациональном диапазоне варьирования $\lambda > \pi/2$ коэффициент формы $k_{\phi I}$ достигает значения 1,6 [24].

4) При гармоническом анализе осциллограмм сварочных трансформаторов и индукторных генераторов переменного тока иногда кроме синусоиды основной частоты обнаруживают еще и периодические колебания тока с более высокой частотой (рис. 6.5, з). Так, при испытании трансформатора STB 250 [86] в кривой тока обнаружены частоты 50 Гц (основная), 150 Гц (третья гармоника с амплитудой до 30 % от основной) и 250 Гц (пятая гармоника с амплитудой 20 %) (см. рис. 11.6, а).

5) Иногда искажения вводятся искусственно для придания кривой тока трапецеидальной формы (рис. 6.5, д), даже более благоприятной для повторного зажигания в сравнении с синусоидой. Это достигается за счет специальной конструкции магнитопровода трансформатора или с помощью подмагничиваемого дросселя [67].

6.3.2. Выпрямленный сварочный ток

Пульсации тока и напряжения зависят от количества фаз, схемы выпрямления, типа вентиля и параметров выходного фильтра. Качество выпрямления принято характеризовать коэффициентом пульсации, например, выпрямленного напряжения:

$$\beta = \frac{U_{m1} - U_{\text{в}}}{U_{\text{в}}},$$

где U_{m1} — амплитудное значение напряжения первой гармоники,

$U_{\text{в}}$ — среднее значение выпрямленного напряжения.

Однофазные выпрямители с наиболее употребляемыми мостовой схемой (рис. 6.6, а) и со схемой с нулевой точкой (рис. 6.6, б) имеют частоту пульсаций двухполупериодного выпрямления 100 Гц. Для обеих схем коэффициент пульсации напряжения холостого хода 0,67, а коэффициент пульсации сварочного тока еще выше из-за нелинейного характера нагрузки — дуги. При отсутствии сглаживающего фильтра дуга периодически гаснет, и сварка в таком режиме прерывистых токов возможна лишь в особо благоприятных условиях (высокий ток, короткая дуга, электроды с рутиловым покрытием). Для сглаживания кривой выпрямленного тока используют следующие приемы [226].

1) Фильтр в виде дросселя L , включенного последовательно с нагрузкой (рис. 6.6, а). Для снижения пульсации тока до технологически допустимого уровня, например, $\beta_{\text{доп}} = 0,5$ индуктивность дросселя принимают из соотношения

$$L \geq \frac{U_{\text{д}}}{2\pi f I_{\text{д}}} \sqrt{\frac{\beta}{\beta_{\text{доп}} - 1}}.$$

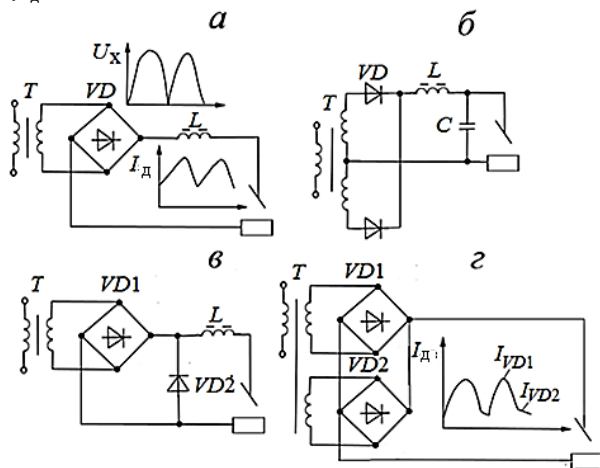


Рис. 6.6. Сглаживание тока в однофазных выпрямителях

2) Фильтр Г-образный (последовательный дроссель L и параллельный конденсатор C) (рис. 6.6, б) опробован в конструкциях маломощных выпрямителей, предназначенных для бытовых и ремонтных работ.

3) Фильтр из последовательного дросселя L и параллельного обратного диода $VD2$ (рис. 6.6, в).

4) Подпитка в виде маломощного выпрямительного блока $VD2$, подключенного параллельно основному $VD1$ (рис. 6.6, г). При ручной сварке для заполнения пауз в кривой тока I_{VD1} основного источника достаточен ток I_{VD2} подпитки около 5–10 А при условии сдвига его кривой на $5 - 10^\circ$ относительно синусоиды основного источника [87].

Многофазные диодные выпрямители (с трехфазной мостовой схемой выпрямления, шестифазной со всеми разновидностями — нулевой, кольцевой, с уравнительным дросселем) имеют одинаковую частоту пульсаций 300 Гц при хорошей сглаженности напряжения холостого хода ($\beta_{U_x} = 0,06$) (рис. 6.7, а). При работе на дугу типичные выпрямители для ручной сварки в диапазоне токов 100–300 А характеризуются небольшой пульсацией тока ($\beta_{I_d} = 0,18 - 0,24$ [24]) и в фильтрах не нуждаются. Нелинейность нагрузки — дуги — приводит к заметному искажению формы кривой тока только при низких режимах и длинной дуге

(рис. 6.7, б). В таких условиях, например, при использовании выпрямителя ВД-306А при токе 70 А коэффициент пульсации тока может увеличиться до 0,57. Более серьезная проблема связана с широкой практикой использования в таких схемах наиболее экономичного несимметричного трехстержневого магнитопровода в составе трехфазного трансформатора. В такой конструкции обмотка на среднем стержне имеет наименьшее индуктивное сопротивление рассеяния, поэтому в кривой выпрямленного тока появляется пик с частотой 100 Гц, вслед за которым возникает провал. Такие нарушения особенно велики у выпрямителей, управляемых трансформатором с магнитным шунтом [50]. Так, у выпрямителя ВД-313 при низком токе 65 А коэффициент пульсации увеличивается до 0,75 (рис. 6.7, в).

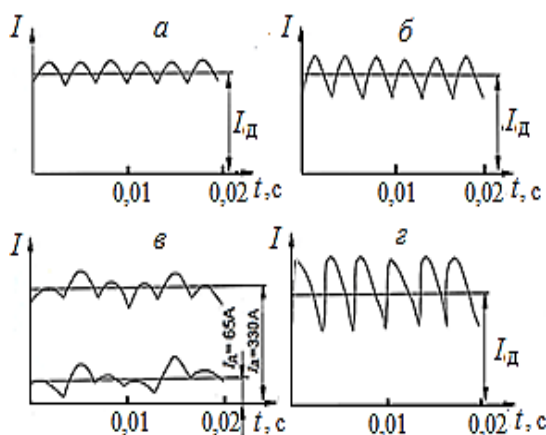


Рис. 6.7. Пульсации тока в многофазных выпрямителях

Тиристорные выпрямители выполняют еще и функцию фазового регулирования, и поэтому им органически присущи сильные пульсации сварочного тока (рис. 6.7, г). У выпрямителей с трехфазной мостовой или шестифазной схемой выпрямления даже при нагружении на линейное активное сопротивление, начиная с угла управления 60° , в кривой тока появляются перерывы ($\beta \approx 1$). В условиях же сварки с учетом нелинейного характера нагрузки недопустимо увеличение угла управления более 45° . В технологическом эксперименте по сварке в углекислом газе [88] обнаружено, что с увеличением угла управления в диапазоне $18\text{--}53^\circ$ стабильность параметров режима непрерывно снижается, а начиная с угла 46° устойчивость процесса нарушается именно из-за появления провалов в кривой тока до нуля.

Приемы снижения пульсаций в многофазных тиристорных выпрямителях показаны на рис. 6.8.

1) Фильтры, состоящие из разных комбинаций дросселя, конденсатора и обратного диода (рис. 6.8, а). Например, в интервалах питания дуги через открытые тиристоры током $i_{д1}$ одновременно запасается энергией дроссель L , а при закрытых тиристорах он возвращает энергию дуге через обратный диод VD током $i_{д2}$. При использовании дросселя без обратного диода его индуктивность вычисляют по соотношению

$$L \geq \frac{U_d}{2\pi f I_d} \sqrt{\left(\frac{\beta}{\beta_{доп}} - 1\right)}$$

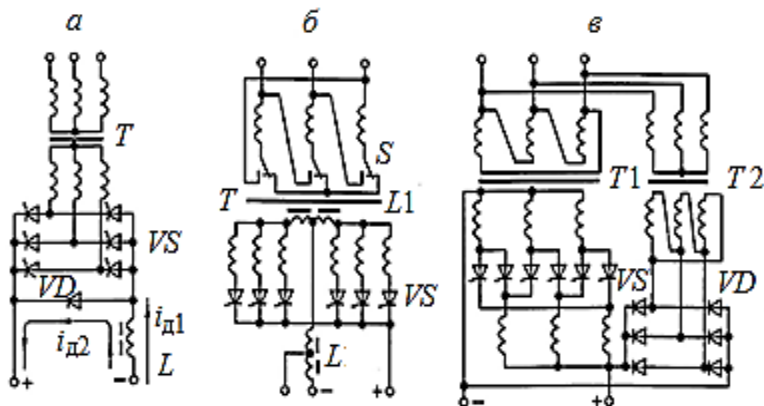


Рис. 6.8. Сглаживание тока в тиристорных выпрямителях:

а — трехфазная мостовая схема выпрямления с фильтром L – VD ,
 б — шестифазная с уравнивающим дросселем $L1$ и переключателем S ,
 в — шестифазная кольцевая с подпиткой $T2$ – VD

2) Ограничение диапазона фазового управления с компенсацией пределов настройки за счет других способов (рис. 6.8, б). На приведенной схеме переключателем S меняют соединение первичных обмоток в звезду или треугольник с кратностью ступенчатой настройки напряжения 1,73. Поэтому для перекрытия этого диапазона плавной фазовой настройкой достаточно угла управления $\alpha \leq 60^\circ$.

3) Подпитка (рис. 6.8, в) может быть образована вспомогательным выпрямительным блоком $T2$ – VD . При ручной сварке покрытым и неплавящимся электродами необходима подпитка на ток 5–30 А, механизированной в защитном газе — на 10–50 А, при автоматической под флюсом — около 100 А.

6.3.3. Ток источников с повышенной частотой преобразования

Для таких источников допустима значительно худшая стабильность тока без ущерба для большинства сварочных свойств.

1) Вентильные генераторы имеют повышенную частоту 200–1000 Гц на промежуточной стадии трехфазного переменного тока, что соответствует частоте пульсаций последующего выпрямления 1,2–6 кГц. На рис. 6.9, *а* представлены осциллограммы вентильного генератора, состоящего из трехфазного индукторного генератора и диодного мостового блока. При частоте переменного тока 240 Гц частота пульсаций выпрямленного тока составляет 1440 Гц при коэффициенте пульсаций $\beta_I = 0,25$. Пульсации напряжения синхронны с пульсациями тока, но меньше по амплитуде — $\beta_U = 0,21$. Обе характеристики пульсаций выше, чем у аналогичных по сварочным параметрам статических преобразователей — диодных выпрямителей. Значительные пульсации объясняются также искажением синусоиды тока на стадии индукторного генератора. В ней кроме основной гармоники имеется третья с амплитудой около 20 % от амплитуды основной синусоиды, возможно — и пятая (см. рис. 6.5, *з*). Это типичный недостаток индукторного генератора осевого типа. С переходом к новому поколению генераторов радиального типа этот дефект изживается [16, 89]. Но даже у генератора осевого типа, в том числе укомплектованного тиристорным блоком, при β_I до 1,0 (т.е. с провалами тока до нуля) устойчивость процесса ручной сварки сохраняется высокой. Дело в том, что при названной частоте тока 1,2–6 кГц длительность провалов не превышает 0,3 мс, в течение которых межэлектродный промежуток не успевает существенно остыть.

2) Чоппер — постовый транзисторный регулятор — понижает постоянное напряжение многопостового выпрямителя в 2–5 раз с формированием необходимой внешней характеристики. На его зажимах колебания напряжения $U_{\text{н}}$ сравнительно велики (рис. 6.9, *б*), что предопределено самим принципом импульсного преобразования. Для приведенного примера частота составляет 12,5 кГц, а коэффициент пульсации относительно велик — $\beta_{U_{\text{н}}} = 0,5$. Несмотря на это, устойчивость оценивается довольно высоко (см. табл. 4.2). Дело в том, что хорошее сглаживание сварочного тока ($\beta_{\text{св}} = 0,18$) и особенно напряжения ($\beta_{U_{\text{св}}} = 0,12$) обеспечивается при таких частотах не только дросселем в составе чоппера, но и индуктивностью сварочных проводов. К тому же интервалы пониженного тока в паузах длятся не более 80 мкс и могут оказаться меньше тепловой постоянной времени дуги (если $\Theta_{\text{д}} > 10^{-4}$ с). Поэтому за время снижения тока дуга не успевает остыть и заметно утратить проводимость, что и гарантирует ее достаточную технологическую устойчивость даже при невысокой стабильности тока — до $\beta_{\text{св}} \approx 1$.

3) Инверторные источники на промежуточной стадии преобразования энергии имеют частоту от 20 до 100 кГц, поэтому частота пульсации сварочного тока составляет от 40 кГц (рис. 6.9, *в*) до 200 кГц. При этом в стремлении к предельной миниатюризации источника сглажива-

ющий дроссель стараются сделать малогабаритным, а поэтому и с индуктивностью всего в несколько микрогенри. У такого источника пульсации тока не приводят еще к сколь-нибудь заметному снижению устойчивости сварочного процесса. Известны даже экспериментальные данные о повышении устойчивости при использовании источников с высокой частотой промежуточного преобразования.

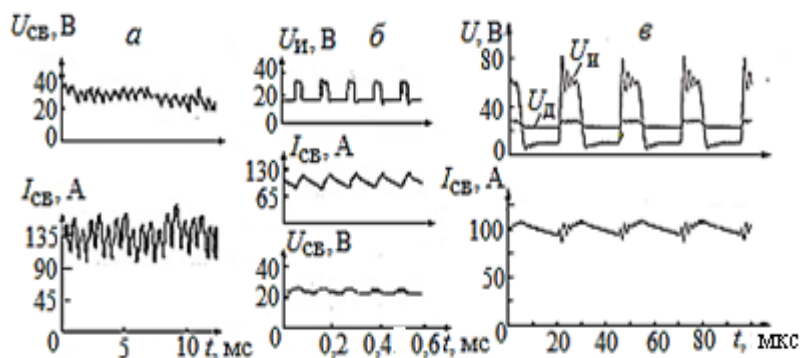


Рис. 6.9. Высоочастотные пульсации при ручной сварке:
а — вентильный генератор ГД-4006, УОНИ 13/55 Ø4 мм, 130 А, 27 В;
б — чоппер ЧПР-315, УОНИ 13/55 Ø3 мм, 100 А, 24 В; в — инверторный источник Урал Мастер 500, электрод LB52U Ø3,2 мм, 100 А, 23 В

6.3.4. Технологические пульсации сварочного тока и напряжения

Возможны как искусственные, так и естественные пульсации, связанные с переносом электродного металла и формированием сварочной ванны. Такие процессы принято характеризовать стабильностью амплитуды и частоты импульсов, т.е. их средними значениями, среднеквадратическими отклонениями и коэффициентами вариации.

Искусственные пульсации генерируются источником или приводом подачи для программного управления в следующих формах:

- в виде мощных пиковых импульсов (см. рис. 8.19), накладываемых на сравнительно низкий базовый ток, с целью управления переносом электродного металла (импульсно-дуговая сварка);

- в виде чередования импульсов и пауз (см. рис. 10.13), соизмеримых по амплитуде и длительности, с целью управления формированием шва (сварка пульсирующей дугой).

Естественные пульсации могут вызываться капельным переносом электродного металла. Особенно велики пульсации (см. рис. 4.20) при механизированной сварке с технологическими короткими замыканиями

(сварка в углекислом газе короткой дугой), а также при ручной сварке электродами с основным и целлюлозным покрытием.

6.4. Нерегулярные колебания сварочного тока и напряжения

Оценим статические и динамические отклонения тока и напряжения, вызванные типичными возмущениями, с помощью приемов теории автоматического управления по уравнениям, приведенным в разд. 4.3.

6.4.1. Ручная сварка покрытым электродом

Отклонения тока и напряжения вызываются как внутренними, так и внешними возмущениями, в основном — по длине дуги и по напряжению источника.

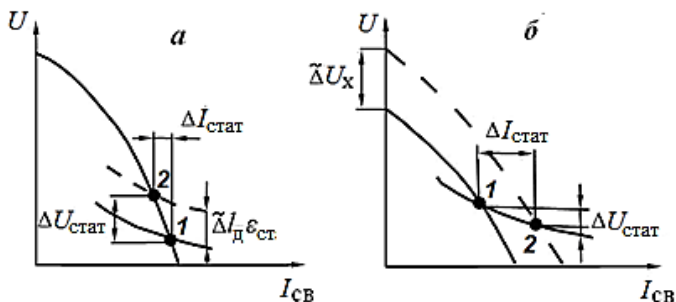


Рис. 6.10. Статические ошибки в энергетической системе ручной сварки при возмущениях по длине дуги (а) и напряжению холостого хода источника (б)

Возмущение по длине дуги $\tilde{\Delta}l_d$ инициирует переходный процесс, отраженный на рис. 6.10, а. Если возмущение $\tilde{\Delta}l_d > 0$, то энергетическая система «источник–дуга» из равновесного состояния, отображаемого т.1, придет в т.2. (подробней в разд. 4.3). Используя уравнение (4.2), определим статическую ошибку системы — установившееся отклонение тока от исходного значения по завершении переходного процесса

$$\Delta I_{\text{стат}} = - \frac{\varepsilon_{\text{ст}} \tilde{\Delta} l_d}{\rho_d - \rho_{\text{и}}} \quad (6.4)$$

Знак «минус» означает, что при удлинении дуги ток уменьшается.

Статическая ошибка по напряжению

$$\Delta U_{\text{стат}} = - \frac{\varepsilon_{\text{ст}} \tilde{\Delta} l_d \rho_{\text{и}}}{\rho_d - \rho_{\text{и}}} \quad (6.5)$$

При сварочном токе более 50 А $\rho_d \approx 0$, поэтому $\Delta U_{\text{стат}} \approx \varepsilon_{\text{ст}} \tilde{\Delta} l_d$.

По этим уравнениям рассмотрим приемы снижения ошибок.

1) Стабилизация напряжения дуги возможна только за счет ограничения колебаний ее длины $\tilde{\Delta}l_d$, поскольку другие члены уравнения — градиент потенциала в столбе $\varepsilon_{ст}$ и наклон статической характеристики дуги ρ_d — являются неизменными атрибутами конкретной технологии и изменению не подлежат. Значение градиента потенциала все же необходимо учитывать, поскольку от его величины зависит величина ошибки по напряжению и тепловая эффективность процесса (у электродов с рутиловым покрытием $\varepsilon_{ст} = 1,5\text{--}2,5$ В/мм, с основным покрытием — $1,8\text{--}2,6$ В/мм, с целлюлозным покрытием — $2,8\text{--}3,8$ В/мм).

2) Для стабилизации тока кроме ограничения колебаний длины дуги полезно и увеличение наклона внешней характеристики источника. Если для сварки в нижнем положении у современного источника принять $\rho_{и}$ от -5 до -1 В/А, то при умеренных колебаниях длины дуги $\tilde{\Delta}l_d = \pm 3$ мм у такого источника отклонения тока по (6.4) не превысят 12 А. Но при сварке в положениях, отличных от нижнего, рекомендуется наклон положе, чем -1 В/А. Это приведет к ухудшению стабильности тока, но даст возможность оперативного управления мощностью и давлением дуги на ванну, и следовательно, формированием шва.

Возмущение по напряжению холостого хода $\tilde{\Delta}U_x$ (рис. 6.10, б) у нестабилизированного источника пропорционально колебаниям напряжения сети, которые в сварочном цехе могут достигать 10 %. Статические ошибки по току и напряжению соответственно

$$\Delta I_{стат} = \frac{\tilde{\Delta}U_x}{\rho_d - \rho_{и}} \quad \text{и} \quad \Delta U_{стат} = \frac{\tilde{\Delta}U_x \rho_d}{\rho_d - \rho_{и}}$$

Поскольку при сварочном токе более 50 А $\rho_d \approx 0$, то и $\Delta U_{стат} \approx 0$.

Основной прием снижения ошибок — стабилизация напряжения холостого хода источника за счет обратной связи по напряжению сети.

6.4.2. Механизированная и автоматическая сварка плавящимся электродом с постоянной скоростью подачи.

Для анализа переходных процессов и определения их результатов при отработке возмущений корректно использование статических характеристик элементов, входящих в состав энергетической системы «источник–подающий механизм–дуга». Тогда система АРДС описывается уравнениями:

$$\begin{aligned} U_{и} &= U_x + I_d (\rho_{и} - R_{вн}) && \text{— источник со сварочной цепью;} \\ U_d &= U_{ка} + \varepsilon_{ст} I_d && \text{— дуга;} \\ I_d &= \frac{V_{под}}{k_{ст}} + \frac{k_{сн}}{k_{ст}} U_d && \text{— АРДС} \end{aligned} \quad (6.6)$$

С помощью статических характеристик, приведенных на рис. 6.11, проанализируем переходные процессы в системе АРДС при типичных возмущениях: по длине дуги, напряжению источника и скорости подачи.

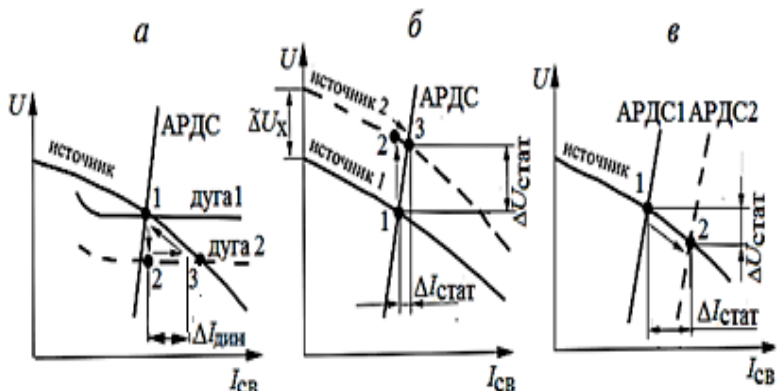


Рис. 6.11. Переходные процессы в системе саморегулирования при возмущениях по длине дуги (а), напряжению источника (б) и скорости подачи (в)

Возмущение по длине дуги $\tilde{\Delta}I_d$ возникает вследствие колебаний горелки вместе с рукой сварщика или манипуляций горелкой, неравномерного плавления электрода и колебаний уровня сварочной ванны. При автоматической сварке длина дуги колеблется также из-за неровных или непараллельных изделию направляющих, по которым перемещается автомат.

При скачкообразном возмущении по длине дуги $\tilde{\Delta}I_d < 0$ ее характеристика из положения «дуга 1» сдвинется в положение «дуга 2» (рис. 6.11, а). При этом пойдет переходный процесс, в пренебрежении динамическими свойствами элементов системы — по траектории точек 1–2–3–1. А если учитывать динамические свойства (электрическую и тепловую инерцию элементов), то траектория будет более плавной — приблизительно по направлению линий со стрелками. В итоге система возвратится в исходное состояние т.1, как и было показано в разд. 4.3 (см. рис. 4.10). Поэтому статические ошибки регулирования нулевые:

$$\Delta I_{\text{стат}} = 0 \text{ и } \Delta U_{\text{стат}} = 0. \quad (6.7)$$

Динамическая ошибка по току $\Delta I_{\text{дин}}$ из (4.8):

$$\Delta I_{\text{дин}} = -\frac{\varepsilon_{\text{ст}} \tilde{\Delta} I_d}{L \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)} \left(e^{-\frac{T_2}{T_1 - T_2} \ln \frac{T_1}{T_2}} - e^{-\frac{T_1}{T_1 - T_2} \ln \frac{T_1}{T_2}} \right) \quad (6.8)$$

График аperiodического переходного процесса $\Delta I_d(t)$ с максимумом $\Delta I_{\text{дин}}$ приведен на рис.4.10, а. Приемы снижения динамической ошибки

с использованием громоздкого уравнения (6.8) анализировать затруднительно. Поэтому обратимся к уравнению (4.8) и упростим его для условия $T_1 \gg T_2$, т.е. учтем в этом уравнении только первое слагаемое. Тогда для отклонения ΔI_d его амплитудное значение не может превышать величину

$$\Delta I_{\max} = - \frac{\varepsilon_{\text{ст}} \tilde{\Delta I_d}}{-\rho_{\text{и}} + R_{\text{вн}}} . \quad (6.9)$$

На рис. 4.10, *a* такой переходный процесс изображен скачком до ΔI_{\max} и последующим спадом отклонения тока до 0. Из уравнения (6.9) видно, что для снижения ΔI_{\max} , а поэтому и $\Delta I_{\text{дин}}$, следует ограничивать уровень возмущения $\tilde{\Delta I_d}$ и увеличивать наклон внешней характеристики $|\rho_{\text{и}}|$.

Но некоторые приемы снижения $\Delta I_{\text{дин}}$ противоречат требованиям повышения быстродействия системы АРДС, которое важно не только для обеспечения устойчивости, но и для уменьшения ошибки по глубине проплавления. Очевидно, что несогласованные воздействия на $\Delta I_{\text{дин}}$ (6.8) и $t_{\text{пер}}$ (4.9) не дадут пользы с точки зрения конечного результата саморегулирования — стабилизации размеров шва.

Интегральный критерий качества саморегулирования J объединяет в себе обе характеристики, $\Delta I_{\text{дин}}$ и $t_{\text{пер}}$, влияющие на плавление основного металла [90]:

$$J = \int_0^{t_{\text{пер}}} \Delta I_d dt \quad (6.10)$$

В геометрическом смысле критерий представляет собой площадь фигуры, охваченной графиком отклонения тока ΔI_d за время переходного процесса $t_{\text{пер}}$ (заштрихована на рис. 4.10, *a*). Очевидно, что для стабилизации размеров шва необходимо стремиться к снижению J . При подстановке в (6.10) значения ΔI_d из (4.8) после преобразований получено

$$J = - \frac{\tilde{\Delta I_d}}{k_{\text{ст}} - k_{\text{сн}}(\rho_{\text{и}} - R_{\text{вн}})} . \quad (6.11)$$

Рассмотрим приемы снижения величины интегрального критерия J по уравнению (6.11), т.е. улучшения качества саморегулирования:

- ограничение возмущения по длине дуги $\tilde{\Delta I_d}$;
- использование проволоки малого диаметра (для увеличения $k_{\text{ст}}$).

Динамические ошибки по току и напряжению, возникающие при колебаниях длины дуги, должны учитываться при анализе устойчивости процесса. Но они, благодаря значительной тепловой инерции сварочной ванны, могут не иметь последствий для размеров шва, поскольку сохраняются всего несколько десятых долей секунды. Напротив, возмущения по напряжению источника и скорости подачи большинством энергети-

ческих систем обрабатываются не полностью, и вызванные ими статические ошибки по току и напряжению отражаются на размерах шва.

Возмущение по напряжению холостого хода $\tilde{\Delta}U_x$ у нестабилизированных источников (трансформаторов, диодных выпрямителей, некоторых генераторов) вызывается, прежде всего, колебаниями напряжения электрической сети, которые в сварочном цехе могут достигать 10 %. Например, при автоматической сварке в углекислом газе на режиме Ø2 мм, 400 А, 35 В, 0,7 м/мин изменение напряжения сети на – 8 % приводит к изменению сварочного напряжения на – 7 %, а сварочного тока на – 16 %, в результате чего образуется непровар, составляющий 22 % от толщины изделия.

При возмущении по напряжению источника $\tilde{\Delta}U_x > 0$ (рис. 6.11, б) его характеристика из положения «источник 1» сдвинется в положение «источник 2». При этом пойдет переходный процесс по траектории точек 1–2–3. Такое возмущение система АРДС обрабатывает не полностью — статические ошибки регулирования $\Delta I_{\text{стат}}$ и $\Delta U_{\text{стат}}$ не нулевые, из них особенно велика ошибка по напряжению. Для определения величины ошибок систему уравнений (6.6) представим в отклонениях, тогда после преобразований статическая ошибка по току

$$\Delta I_{\text{стат}} = \frac{\tilde{\Delta}U_x k_{\text{сн}}}{k_{\text{ст}} - k_{\text{сн}}(\rho_{\text{и}} - R_{\text{вн}})}, \quad (6.12)$$

по напряжению

$$\Delta U_{\text{стат}} = \frac{\tilde{\Delta}U_x k_{\text{ст}}}{k_{\text{ст}} - k_{\text{сн}}(\rho_{\text{и}} - R_{\text{вн}})}. \quad (6.13)$$

Возмущение по скорости подачи $\tilde{\Delta}V_{\text{под}}$ наблюдается у приводов с нестабилизированным питанием, а также происходит из-за проскальзывания проволоки в роликах подающих механизмов при изменении сопротивления сматыванию и проталкиванию проволоки [24]. С помощью рис. 6.11, в поясним ход электрических процессов. При возмущении $\tilde{\Delta}V_{\text{под}} > 0$ характеристика системы саморегулирования сдвинется из положения «АРДС1» в положение «АРДС2». При этом пойдет переходный процесс по траектории точек 1–2. Статические ошибки такого регулирования $\Delta I_{\text{стат}}$ и $\Delta U_{\text{стат}}$ не нулевые, из них особенно велика ошибка по току. Представим в отклонениях систему уравнений (6.6), тогда после преобразований статическая ошибка по току

$$\Delta I_{\text{стат}} = \frac{\tilde{\Delta}V_{\text{под}}}{k_{\text{ст}} - k_{\text{сн}}(\rho_{\text{и}} - R_{\text{вн}})} \quad (6.14)$$

по напряжению

$$\Delta U_{\text{стат}} = \frac{\bar{\Delta} V_{\text{под}}(\rho_{\text{и}} - R_{\text{вн}})}{k_{\text{ст}} - k_{\text{сн}}(\rho_{\text{и}} - R_{\text{вн}})}. \quad (6.15)$$

Ниже приведены приемы, которые совместно решают задачи снижения статических ошибок при возмущениях как по напряжению холостого хода источника, так и по скорости подачи проволоки:

- стабилизация напряжения холостого хода источника за счет обратной связи по напряжению сети;
- использование источника с жестким участком на комбинированной внешней характеристике ($\rho_{\text{и}}$ от $-0,07$ до $+0,1$ В/А);
- снижение сопротивления внешнего контура сварочной цепи $R_{\text{вн}}$ за счет сокращения длины сварочных проводов и увеличения их сечения;
- стабилизация скорости подачи обратными связями по частоте вращения или ЭДС якоря коллекторного двигателя, или использование трехфазного асинхронного двигателя;
- уменьшение диаметра электродной проволоки ($k_{\text{ст}} \uparrow$).

6.4.3. Автоматическая сварка аппаратами системы АРНД

Сварка под флюсом толстым плавящимся электродом выполняется с использованием автоматического регулятора напряжения дуги с воздействием на скорость подачи (АРНД_в) (рис. 4.11). При аргонодуговой сварке тонколистовых конструкций обычно используют автоматический регулятор напряжения с воздействием на длину дуги (АРНД) (рис. 4.12).

Возмущения по длине дуги оба регулятора отрабатывают астатически. При возмущениях по напряжению холостого хода у обеих систем статическая ошибка по напряжению близка к нулю, а ошибка по току довольно велика:

$$\Delta I_{\text{стат}} = \frac{\bar{\Delta} U_{\text{x}} k_{\text{рн}}}{k_{\text{ст}} - k_{\text{рн}} \rho_{\text{и}}} \text{ для системы АРНД}_v, \quad (6.17)$$

$$\Delta I_{\text{стат}} = \frac{\bar{\Delta} U_{\text{x}}}{\rho_{\text{д}} - \rho_{\text{и}}} \text{ для системы АРНД}_l. \quad (6.18)$$

Для снижения ошибки по току в обеих системах следует использовать источник со стабилизированным напряжением холостого хода и падающей внешней характеристикой, лучше — вертикальной.

6.4.4. Вычисление статических ошибок

Статические отклонения тока и напряжения в вышеописанных системах можно вычислять по уравнениям (6.4–6.18), которые для удобства пользования и сравнения сведены в табл. 6.3. Жирным шрифтом выделены наиболее значительные ошибки. Типичные значения коэффициентов для расчетов показаны в табл. 6.4 [6, 48].

Таблица 6.3.

Статические ошибки по току $\Delta I_{\text{стат}}$ и напряжению $\Delta U_{\text{стат}}$ у наиболее распространенных энергетических систем дуговой сварки.

Система	Возмущение		
	По длине дуги $\tilde{\Delta} I_{\text{д}}$	По напряжению источника $\tilde{\Delta} U_{\text{х}}$	По скорости подачи $\tilde{\Delta} V_{\text{под}}$
Ручная сварка	$\Delta I_{\text{стат}} =$ $= - \frac{\varepsilon_{\text{ст}} \tilde{\Delta} I_{\text{д}}}{(\rho_{\text{д}} - \rho_{\text{и}})}$ $\Delta U_{\text{стат}} =$ $= - \frac{\varepsilon_{\text{ст}} \tilde{\Delta} I_{\text{д}} \rho_{\text{и}}}{(\rho_{\text{д}} - \rho_{\text{и}})}$	$\Delta I_{\text{стат}} = \frac{\tilde{\Delta} U_{\text{х}}}{(\rho_{\text{д}} - \rho_{\text{и}})}$ $\Delta U_{\text{стат}} = \frac{\tilde{\Delta} U_{\text{х}} \rho_{\text{д}}}{(\rho_{\text{д}} - \rho_{\text{и}})}$	—
Система саморе- гулиро- вания АРДС	$\Delta I_{\text{стат}} = 0$ $\Delta U_{\text{стат}} = 0$	$\Delta I_{\text{стат}} =$ $= \frac{\tilde{\Delta} U_{\text{х}} k_{\text{сн}}}{k_{\text{ст}} - k_{\text{сн}} (\rho_{\text{и}} - R_{\text{вн}})}$ $\Delta U_{\text{стат}} = \frac{\tilde{\Delta} U_{\text{х}} k_{\text{ст}}}{k_{\text{ст}} - k_{\text{сн}} (\rho_{\text{и}} - R_{\text{вн}})}$	$\Delta I_{\text{стат}} =$ $= \frac{\tilde{\Delta} V_{\text{под}}}{k_{\text{ст}} - k_{\text{сн}} (\rho_{\text{и}} - R_{\text{вн}})}$ $\Delta U_{\text{стат}} =$ $- \frac{\tilde{\Delta} V_{\text{под}} (\rho_{\text{и}} - R_{\text{вн}})}{k_{\text{ст}} - k_{\text{сн}} (\rho_{\text{и}} - R_{\text{вн}})}$
Система регули- рования напряже- ния АРНД _V	$\Delta I_{\text{стат}} = 0$ $\Delta U_{\text{стат}} = 0$	$\Delta I_{\text{стат}} = \frac{\tilde{\Delta} U_{\text{х}} k_{\text{рн}}}{k_{\text{ст}} - k_{\text{рн}} \rho_{\text{и}}}$ $\Delta U_{\text{стат}} = \frac{\tilde{\Delta} U_{\text{х}} k_{\text{ст}}}{k_{\text{ст}} - k_{\text{рн}} \rho_{\text{и}}}$	—
Система регули- рования напряже- ния АРНД _I	$\Delta I_{\text{стат}} = 0$ $\Delta U_{\text{стат}} = 0$	$\Delta I_{\text{стат}} = \frac{\tilde{\Delta} U_{\text{х}}}{(\rho_{\text{д}} - \rho_{\text{и}})}$ $\Delta U_{\text{стат}} = 0$	—

Таблица 6.4.

Параметры энергетических систем для расчета статических ошибок

Параметр		Символ	Размерность	Порядок величин	Примеры
Наклон вольт-амперной характеристики дуги		ρ_d	В/А	$-24 \dots +0,15$	0,07–0,13 — Св-08Г2С, Ø1 мм, CO ₂ ; 0,03–0,034 — Св-08Г2С, Ø2 мм, CO ₂ ; 0,02–0,03 — Св-06Х18Н8, Ø1,6 мм, Аг; 0,022–0,034 — Св-АМг6, Ø2 мм, Аг; 0,01 — Св-08, Ø2 мм, флюс АН-348А [8, 53]
Наклон статической характеристики источника		$\rho_{и}$	В/А	$-\infty \dots +0,1$	– 0,55...– 0,25 — выпрямитель ВД-306Э, – 5 — выпрямитель ВДУ-306МТ; – 1,3... – 0,07 — чоппер ЧПР-315; – 0,8 ... – 0,2 — генератор ГД-4006; – 1,2... – 0,1 — трансформатор ТДМ-401 [Паспорта и технические описания]
Градиент потенциала столба дуги		$\varepsilon_{ст}$	В/мм	0,7–3,8	2,3–2,5 — МР-3; 2,0–2,2 — ОЗС-4; 2,0 — УОНИ 13/55; 2,8–3,2 — ВСЦ-4А [Ø4мм,] 1,7–3,3 — Св-08Г2С, CO ₂ ; 0,8–1,3 — Св-АМг61, Аг
Сопротивление внешнего контура		$R_{вн}$	Ом	0–5	0,1–5 — РБ-306
Коэффициенты	саморегулирования по току	$k_{ст}$	мм/сА	0,05–0,82	0,68 — Ø1,2 мм, 0,36 — 1,6 мм, 0,16 — 2,4 мм [алюминий, Аг] 0,49 — 1,2 мм [нержав. сталь, Аг] 0,82 — Ø0,8 мм; 0,37 — 1,2 мм; 0,25 — 1,6 мм [сталь, CO ₂] 0,28–0,30 — Ø2 мм, 0,08–0,17 — Ø3 мм, 0,09 — Ø4 мм, 0,05 — Ø5 мм, [Св-08А, флюс АН348]
	саморегулирования по напряжению	$k_{сн}$	мм/сВ	0,03–2	0,57–0,61 — Ø2 мм, 0,09 — Ø3 мм, 0,04 — Ø4 мм, 0,03 — Ø5 мм, [Св-08А, флюс АН348]
	Регулятора напряжения	$k_{рн}$	мм/сВ	(0,04-0,4) $k_{узн}$	$k_{узн} = 20-150$ — коэффициент усиления привода

6.5. Стабильность и другие характеристики механизмов подачи и перемещения

6.5.1. Назначение и типы приводов

Для подачи электродной проволоки обычно используется механизм в следующем составе: блок электрического питания, электрический двигатель, механический редуктор, подающий и прижимной ролики, осуществляющие движение проволоки со скоростью $V_{\text{под}}$, а также кассету с проволокой. Для перемещения сварочного аппарата используется подобный механизм, но в качестве передаточных устройств после редуктора он имеет сцепную муфту, механическую передачу (зубчатую, цепную или ременную), а также приводные колеса, обеспечивающие движение аппарата со скоростью $V_{\text{св}}$. Актуальность проблемы обеспечения высокой надежности механизмов подтверждают статистические сведения о частоте отказов сварочной техники. Так, при монтаже предприятий ядерной технологии 60–70 % всех отказов сварочного оборудования приходится на механическую часть сварочного аппарата.

Механизм подачи проволоки при ее диаметре до 4–5 мм обычно имеет постоянную скорость (система АРДС), при большем диаметре — скорость, зависящую от напряжения дуги (система АРНД_V). Реверсирование подачи выполняется только при настроечных операциях, а также при зажигании дуги в аппаратах для автоматической сварки. По ГОСТ 18130-79 «Полуавтоматы для дуговой сварки плавящимся электродом» и ГОСТ 8213-73 «Автоматы...» [91] скорость подачи настраивается в интервале 1–16 м/мин с точностью не хуже 8 %. В процессе сварки при допустимых изменениях напряжения сети и механической нагрузки скорость должна поддерживаться со стабильностью не хуже 8 % для автоматической сварки и не хуже 10 % — для механизированной.

Механизм перемещения по ГОСТ 8213-73 обеспечивает постоянную скорость сварки в диапазоне 12–120 м/час со стабильностью не хуже 8 % и может переключаться на маршевую скорость до 1000 м/час. В состав аппарата для автоматической сварки входят и другие механизмы — вертикального и поперечного настроечного или следящего перемещения, подачи присадочной проволоки и др. Но требования к стабильности их скоростей не так высоки, как для приводов подачи электродной проволоки и сварочного перемещения. Поэтому стандартами они не регламентируются и далее не рассматриваются.

Два первых устройства в составе механизмов подачи и перемещения — блок питания и двигатель — объединяют в общее понятие электропривода. Именно его характеристики рассмотрены в данном разделе. Бывают приводы непрерывного и импульсного действия.

Приводы непрерывного действия [24, 92, 93]:

- с асинхронным двигателем,
- тиристорный с коллекторным двигателем,
- транзисторный с коллекторным двигателем,
- частотно-регулируемый с асинхронным двигателем.

Импульсные приводы, используемые преимущественно в механизмах подачи для управления переносом электродного металла, описаны в разд. 8.5:

- вентильный с бесколлекторным двигателем,
- электромагнитный.

Электрически не регулируемый привод (с трехфазным асинхронным двигателем) — простое и надежное устройство с очень высокой стабильностью скорости, поскольку частота вращения двигателя равна или пропорциональна частоте напряжения сети с небольшим отставанием — скольжением, не превышающим 5 % при номинальной нагрузке. Для настройки скорости к нему прилагается набор сменных шестерен. Главный и решающий для отказа от дальнейшего его использования в сварочных аппаратах недостаток — невозможность плавной настройки скорости. Такой привод широко использовался в первых сварочных аппаратах, но теперь почти повсеместно вытеснен приводами с коллекторным двигателем.

Тиристорный привод (реверсивный тиристорный выпрямительный блок + коллекторный двигатель постоянного тока с независимым возбуждением) для примера показан в составе механизма перемещения сварочного аппарата (рис. 6.12, а). Современный тиристорный привод выполняет функции плавной настройки скорости с кратностью до 10, стабилизацию скорости с отклонениями при нагрузке не более 5 %, бесконтактное реверсирование, а также электродинамическое торможение, т.е. быстрый останов двигателя за счет противотока в обмотке его якоря [94]. Необходимую стабильность ему придают отрицательные обратные связи по частоте вращения. Наиболее рационально использовать с этой целью напряжение, снимаемое с обмотки якоря двигателя. Якорь при работе двигателя вырабатывает противо-ЭДС $E_{\text{я}}$, пропорциональную частоте вращения ω (рис. 6.12, б). В интервале α из напряжения на обмотке якоря $U_{\text{я}}$ выделяют ЭДС $E_{\text{я}}$ и подают ее в виде сигнала обратной связи в устройство сравнения УС. Сигнал $U_{\text{зс}}$ от задатчика скорости ЗС сравнивается в УС с сигналом $E_{\text{я}}$, а их разность подается на управляющий вход тиристорного регулятора ТР. Регулятор выпрямляет переменное напряжение сети $U_{\text{с}}$ и своим выходным сигналом $U_{\text{ТР}}$ питает двигатель М, который с помощью редуктора Р перемещает тележку Т со скоростью $V_{\text{св}}$. Такой привод наиболее распространен в механизмах подачи проволоки и перемещения аппарата для дуговой сварки.

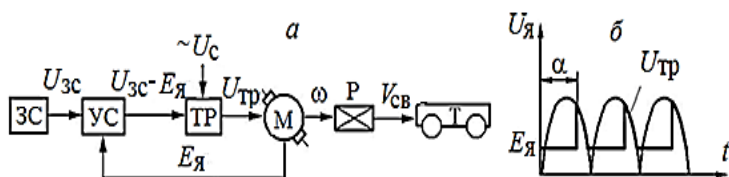


Рис. 6.12. Тиристорный привод перемещения с обратной связью по ЭДС якоря

Транзисторный привод (транзисторный генератор импульсного тока + коллекторный двигатель) рассмотрим в составе механизма подачи электродной проволоки (рис. 6.13). Такой привод питается от источника постоянного напряжения U_B , например, непосредственно выпрямленным сварочным напряжением, и может иметь обратные связи по частоте вращения или по току нагрузки. В качестве примера на рис. 6.13, а показан привод с широтно-импульсным модулятором ШИМ для питания якоря двигателя с тахогенератором ТГ в цепи обратной связи по частоте вращения. Принцип регулирования скорости подачи понятен из рис. 6.13, б. Транзисторы в составе ШИМ работают в ключевом режиме и вырабатывают импульсы напряжения $U_{\text{ШИМ}}$, с постоянной частотой $f = 1/T$, но с разной длительностью. При увеличении длительности импульса возрастает среднее значение напряжения $U_{\text{ШИМ}}$, а поэтому и частота вращения двигателя ω и скорость подачи проволоки $V_{\text{под}}$.

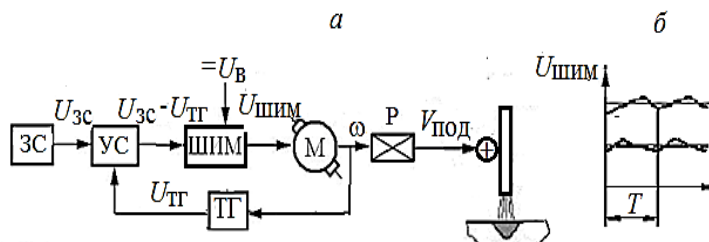


Рис. 6.13. Транзисторный привод подачи проволоки

Такой привод выполняет все функции, приведенные ранее для тиристорного привода, но с более высокой точностью. С его помощью, в частности, можно обеспечить импульсную подачу проволоки с частотой до 10 Гц с целью программного управления формированием шва. Это перспективный, хотя и более сложный привод, рационально его применение в системах числового программного управления. Более простые схемы приводов без ШИМ и ТГ, к тому же с работой транзисторов в усилительном режиме, приведены в работе [94].

Частотно-регулируемый привод (инверторный преобразователь частоты + асинхронный двигатель), например, может быть предназначен

для вращения на роликовом стенде свариваемого изделия (рис. 6.14). Трехфазный автономный инвертор АИН, собранный из шести силовых транзисторов и шести обратных диодов, преобразует постоянное выпрямленное напряжение U_B в три синусоидальных сигнала с частотой 10–100 Гц, которые подаются на обмотки статора асинхронного двигателя М. Формирование переменного напряжения выполняется с помощью широтно-импульсного модулятора ШИМ по шести одинаковым каналам. Рассмотрим ход сигнала в паре таких каналов, предназначенной для формирования одной из синусоид U_a . Инверторный ШИМ вырабатывает пачку прямоугольных импульсов $U_{\text{ШИМ}}$, сначала нарастающих, а затем спадающих по ширине. Частота импульсов $1/T_{\text{ИНВ}}$ имеет порядок сотен герц. АИН усиливает эти сигналы, но благодаря большой индуктивности обмотки двигателя напряжение U_a на ней приобретает синусоидальную форму с частотой $f_{\text{АИН}} = 1/T_{\text{ДВ}}$ (синусоида U_a показана на фоне прямоугольных импульсов ШИМ). Подобным образом формируются еще две симметрично сдвинутые синусоиды U_b и U_c . Настройка частоты $f_{\text{АИН}}$, а следовательно и скорости сварки $V_{\text{СВ}}$ выполняется задатчиком скорости ЗС. Стабильность скорости сварки обеспечивается самим принципом действия асинхронного двигателя, у которого частота вращения почти не отличается от частоты питания $f_{\text{АИН}}$. В описанном приводе используется простой асинхронный двигатель переменного тока, не имеющий ни коллектора, ни вращающихся обмоток. Но инверторный преобразователь частоты даже при использовании мощных *IGBT*-транзисторов относительно сложен и дорог, что воспринимается как естественная плата за высокую надежность привода в целом. Пока еще опыт эксплуатации частотно-регулируемого привода в сварочных установках невелик, но за ним будущее.

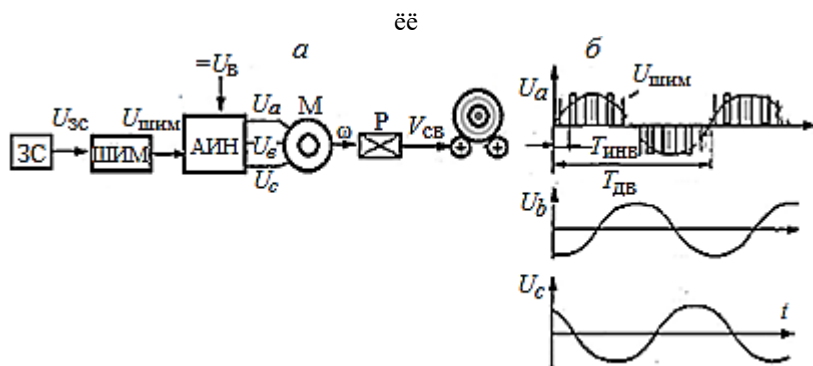


Рис. 6.14. Частотно-регулируемый привод вращения свариваемого изделия

6.5.2. Возмущения, вносимые в работу механизмов подачи и перемещения.

Колебания напряжения сети. Они сравнительно легко отрабатываются блоком питания, реализующим принцип инвариантности, т.е. реагирующим только на это возмущение. Напряжение на выходе такого блока поддерживается с точностью не хуже 5 %. Но большинство блоков реализуют другой – компенсационный – принцип управления и имеют цепи отрицательной обратной связи по скорости подачи или перемещения. Они реагируют на отклонения скорости, какими бы возмущениями они ни вызывались. Стабильность скоростей подачи и перемещения в компенсационных системах ниже, по ГОСТ она должна укладываться в 8 – 10 %.

Изменения момента сопротивления вращению двигателя. В механизмах подачи они возникают при помехах проталкиванию проволоки по гибкому шлангу, правильному устройству и токоподводящему наконечнику, а также при помехах сматыванию проволоки из приторможенной кассеты [24]. В сварочных полуавтоматах проволока подается по направляющему каналу, размещенному внутри гибкого шланга. Канал изготовлен из высокоуглеродистой пружинной проволоки, свернутой в виде спирали с внутренним отверстием, превышающим диаметр сварочной проволоки на 0,5–2 мм. При меньшем отверстии существенно увеличивается сопротивление проталкиванию проволоки, при большем — проволока теряет устойчивость и подается из горелки рывками. Минимальная длина гибкого шланга 1,5–3 м для проволок диаметром соответственно 0,8–2 мм. Сопротивление проталкиванию имеет порядок 10–300 Н, оно увеличивается при увеличении диаметра и жесткости сварочной проволоки. Сопротивление также зависит от длины шланга, от радиуса и числа его перегибов, а также от засорения канала окалиной и стружкой с поверхности сварочной проволоки.

Особенно опасные возмущения наблюдаются при периодических «схватываниях» — привариваниях проволоки к токоподводу [95]. При этом проволока собирается в виде спирали внутри гибкого шланга, а накопив энергию упругих деформаций, «выстреливается» из горелки со скоростью до 33 м/мин, что превышает скорость подачи на порядок. В результате проволока закорачивается на ванну, что при погружении ее на глубину более 0,3–0,8 мм может привести к нарушению сварочного процесса.

В работе [93] показано, что даже при стабильной частоте вращения подающего ролика действительная скорость подачи проволоки на выходе из токоподводящего наконечника может иметь периодический характер — на постоянную скорость подачи $V_{\text{под}}$ накладываются знакопеременные колебания с амплитудой до 30 %. Приходится учитывать две причины колебаний скорости подачи. Во-первых, колебания вызываются

«схватываниями» проволоки с наконечником с частотой, близкой к частоте переноса. Во-вторых, возникают собственные колебания, частота которых зависит от размеров и механических характеристик проволокоподающего тракта — длины, диаметра и жесткости направляющего канала, а также от диаметра и жесткости сварочной проволоки. Нежелательно совпадение этих частот, которое может вызвать явление резонанса и резкие рывки подачи. Так, при сварке проволокой Св-08Г2С диаметром 1,2 мм с использованием полуавтомата А825М с гибким шлангом длиной 2,5 м собственная частота колебаний скорости составила 60–65 Гц. Такая же частота переноса при сварке данной проволокой получается при токе 220 А. В этой ситуации рекомендуется избегать таких режимов, либо изменить параметры гибкого шланга.

В механизмах перемещения возмущения появляются при изменении сопротивления движению (при изменении наклона направляющих рельсов, возрастании реакции подтягиваемых проводов, снижении массы полезного груза по мере расходования проволоки и флюса и т.д.).

Такие возмущения в приводах подачи и перемещения отражаются на характеристиках работы двигателя — токе, напряжении, противо-ЭДС якоря и частоте вращения — и поэтому могут быть зафиксированы соответствующими датчиками, введены в виде сигналов обратных связей в устройства сравнения и с той или иной точностью обработаны.

Изменения скорости подачи или скорости сварки, вызванные нарушением кинематической связи механизмов. В механизмах подачи — это проскальзывание подающих роликов по проволоке вплоть до полной остановки подачи при непрерывно вращающихся роликах. В механизмах перемещения — это пробуксовка приводных колес по направляющим. Такие возмущения почти не отражаются на электрических характеристиках работы приводов, поэтому особенно трудны для отработки.

6.5.3. Испытания приводов на стабильность скорости

Стандартные методы испытаний приводов изложены в ГОСТ 18130-79 и 8213-73 [91]. В них указаны допустимые отклонения скоростей подачи и сварки при возмущениях по сети питания и нагрузке.

Относительные изменения скорости подачи полуавтомата для механизированной сварки при изменении напряжения питания привода и разных механических нагрузках — непосредственный критерий, предусмотренный в ГОСТ 18130-79. Они определяются в эксперименте с подачей проволоки без зажигания дуги в следующем порядке:

— в подающий механизм заправляется проволока наименьшего по паспорту диаметра, обеспечивается номинальное значение напряжения

питания привода и устанавливается максимальная по паспорту скорость подачи;

- гибкий шланг с горелкой укладывается на горизонтальной поверхности и распрямляется;

- запускается привод подачи на время $t_{\text{под}}$, фиксируемое секундомером, длительностью не менее 10 с;

- измеряется длина проволоки $l_{\text{под}}$, поданной из токоподводящего наконечника, и вычисляется скорость подачи по уравнению $V_{\text{под}} = l_{\text{под}} / t_{\text{под}}$;

- повторяется эксперимент при напряжении питания привода, отличающемся на +5 % и – 10 % от номинального, и вычисляются относительные изменения скорости подачи от полученной ранее при номинальном напряжении $(\Delta V_{\text{под}} / V_{\text{под}}) 100 \%$;

- повторяется эксперимент на нормальном, повышенном и пониженном напряжении при использовании проволоки наибольшего по паспорту диаметра и минимальной скорости подачи;

- проверяется обеспечение паспортного значения дополнительной тяговой нагрузки $P_{\text{доп}}$ — ее определяют подъемом груза, подвешенного к сварочной проволоке максимального диаметра, со скоростью, соответствующей номинальному сварочному току (дополнительная тяговая нагрузка должна быть не менее 100 Н для стальной проволоки диаметром до 1,4 мм и любой алюминиевой, и не менее 200 Н для стальной проволоки большего диаметра).

Относительные изменения скорости подачи аппарата системы АРДС для автоматической сварки при изменении механической нагрузки и напряжения питания привода — непосредственный критерий, предусмотренный в ГОСТ 8213-73. Он определяется в эксперименте с подачей проволоки без сварки в следующем порядке:

- в подающий механизм заправляется проволока наибольшего по паспорту диаметра с вылетом из токоподвода на необходимую длину (1–2 м), обеспечивается номинальное напряжение питания привода и устанавливается скорость подачи, соответствующая номинальному току аппарата;

- запускается привод подачи на подъем проволоки к токоподводу с фиксированием времени $t_{\text{под}}$ секундомером;

- измеряется длина проволоки $l_{\text{под}}$, поданной за время подъема и вычисляется скорость подачи по формуле $V_{\text{под}} = l_{\text{под}} / t_{\text{под}}$;

- повторяется эксперимент с дополнительной тяговой нагрузкой $P_{\text{доп}}$, которая имитируется подвешиванием к концу проволоки груза, указанного в технических условиях на аппарат;

- повторяются оба эксперимента при напряжении питания привода, отличающемся на + 5 % и – 10 % от номинального, и вычисляются

относительные изменения скорости подачи от полученной при номинальном напряжении без дополнительной нагрузки $(\Delta V_{\text{под}}/V_{\text{под}}) \cdot 100 \%$;

— итогом испытания являются максимальные относительные изменения скорости подачи при одновременных изменениях механической нагрузки и напряжения питания привода.

Относительные изменения скорости автоматической сварки при изменении напряжения питания привода и механической нагрузки — непосредственный критерий стабильности перемещения. Его определение не предусмотрено стандартной методикой испытания аппарата, но предлагается здесь по аналогии с методикой испытания привода подачи (без сварки) в следующем порядке:

— загружаются на полную емкость кассета электродной проволокой и бункер флюсом, обеспечивается номинальное напряжение питания привода и устанавливается минимальная скорость сварки;

— запускается в режиме настройки привод перемещения с фиксированием времени $t_{\text{св}}$ секундомером;

— измеряется длина пути $l_{\text{св}}$, пройденного аппаратом, и вычисляется скорость сварки по уравнению $V_{\text{св}} = l_{\text{св}}/t_{\text{св}}$;

— повторяется эксперимент при напряжении питания привода, отличающемся на $+5\%$ и -10% от номинального, и вычисляются относительные изменения скорости сварки от полученной при номинальном напряжении $(\Delta V_{\text{св}}/V_{\text{св}})100\%$;

— повторяется эксперимент при номинальном, повышенном и пониженном напряжении на максимальной скорости;

— итогом испытания являются максимальные относительные изменения скорости перемещения при изменениях напряжения питания привода (по отдельности на минимальной и максимальной скорости).

В соответствии с ГОСТ 8213-73 проверяется обеспечение паспортного значения дополнительного тягового усилия на минимальной и максимальной скорости сварки при минимальной и полной загрузке аппарата и снятых проводах и шлангах. Дополнительная нагрузка $P_{\text{доп}}$ имитируется подъемом груза, подвешенного к тросику, перекинутому через блок и закрепленному на тележке аппарата на равном расстоянии между колесами на уровне их осей. Например, подъем груза массой 15 кг имитирует действие дополнительного тягового усилия в 147 Н. Минимальная загрузка аппарата соответствует 10 %-ному заполнению кассеты сварочной проволокой и бункера флюсом.

Коэффициент вариации сварочного напряжения, т.е. отношение среднеквадратического отклонения сварочного напряжения $\sigma_{U_{\text{св}}}$ к его среднему значению $U_{\text{св.ср}}$ — нестандартный непосредственный критерий, характеризующий стабильность подачи проволоки в системе АРДС [96]. Логика авторов этого критерия такова. Назначение механизма по-

дачи — поддержание непрерывно горящей дуги, что гарантируется высокой стабильностью ее длины, а следовательно, и стабильностью напряжения. Видимо, этот критерий можно рекомендовать как дополнительный к вышеописанным. В частности, с его помощью можно выявить нарушения процесса, вызванные проскальзыванием роликов по проволоке, а также заеданием подачи в шланге или токоподводе.

Пример оценки стабильности скоростей подачи и сварки выполнен при испытании аппарата АДФ-2х630 для двухдуговой сварки под флюсом.

1) Механизм подачи содержит мотор-редуктор WG7185 (коллекторный двигатель постоянного тока с независимым возбуждением, 24 В, 10 А, 3220 об/мин, со встроенным червячным редуктором 50/1), два подающих механизма Tbi 404A, а также транзисторный модуль для питания обмотки якоря. Результаты эксперимента отражены в табл. 6.5 .

Таблица 6.5.

Стабильность скорости подачи и другие характеристики подающего механизма (аппарат АДФ-2х630, одна проволока Св-08Г2С Ø2 мм)

Установленная скорость подачи, м/мин	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0
Фактическая скорость подачи, м/мин	1,03	2,07	3,06	4,14	5,17	6,25
Фактическая скорость подачи с дополнительной нагрузкой 200 Н, м/мин	1,04	2,00	2,99	4,03	5,04	6,06
Относительное изменение скорости, %	+0,97	– 3,38	– 2,29	– 2,66	– 2,51	– 3,04
Ток якоря двигателя с дополнительной нагрузкой, А	6,5	6,7	6,9	7,2	7,5	7,7

Точность настройки режима оценим, сопоставляя установленное на табло значение скорости подачи с фактическим значением, полученным без дополнительной нагрузки. Ошибка настройки составила в среднем + 3,3 %, не превышая в каждом случае + 4,2 %. Такое же сопоставление установленного на табло значения с фактическим при более, чем вдвое увеличенном сопротивлении подаче, полученном при дополнительной нагрузке, дает среднюю ошибку + 1,1 %.

Стабильность скорости подачи в соответствии с ГОСТ 8213-73 оценивали по относительному изменению скорости в результате приложения дополнительной тяговой нагрузки в 200 Н. Изменение в среднем составило – 2,5 %, не пре-

вышая в любом случае – 3,38 %. Такая высокая стабильность объясняется наличием обратной связи по ЭДС двигателя, а также точной настройкой пропорционально-интегрального (ПИ-) регулятора в составе транзисторного модуля.

Рекомендуемое ГОСТом испытание при разных значениях питающего напряжения не выполнялось, поскольку привод питается стабилизированным напряжением $24 \text{ В} \pm 5 \%$. По требованию ГОСТ измерялся также ток якоря. В самых жестких условиях нагружения привода — при более чем двукратном увеличении тяговой нагрузки — ток не превышает 7,7 А, что составляет 77 % от номинального значения.

2) Механизм перемещения содержит мотор-редуктор SF7152 (коллекторный двигатель постоянного тока с независимым возбуждением, 24 В, 5 А, 2730 об/мин, со встроенным редуктором 100/1), червячный редуктор РЧ-25М, сцепную муфту, две цепные передачи, два приводные колеса, а также транзисторный модуль для питания обмотки якоря. Результаты эксперимента приведены в табл. 6.6.

Таблица 6.6.

Стабильность скорости сварки и другие характеристики привода перемещения (аппарат АДФ-2х630)

Загрузка проволокой и флюсом		На 10 %					Полная				
Установленная скорость сварки, м/мин		0,2	0,5	1,0	1,5	2,0	0,2	0,5	1,0	1,5	2,0
Фактическая скорость сварки с нагрузкой $P_{\text{доп}}$, м/мин	0	0,20	0,49	0,97	1,51	2,08	0,20	0,48	0,96	1,49	2,04
	50Н	0,20	0,49	0,97	1,49	2,01	0,20	0,48	0,95	1,48	2,01
	100Н	0,20	0,48	0,96	1,47	1,95	0,20	0,47	0,93	1,42	1,95
	150Н	пробуксовка					0,19	0,46	0,90	1,38	1,90
Относительное изменение скорости при $P_{\text{доп}} = 100 \text{ Н}$, %		0	-2,0	-1,0	-2,6	-6,3	0	-2,1	-3,1	-4,7	-4,4
Ток якоря двигателя при $P_{\text{доп}} = 150 \text{ Н}$, А		–	–	–	–	–	2,6	2,7	2,9	2,95	3,0

Точность настройки скорости перемещения (скорости сварки) довольно высока — фактическая скорость перемещения в режиме без дополнительной нагрузки отличается от заданного на табло значения не более чем на 4 %. Но даже при дополнительной нагрузке 100 Н, что приводит примерно к полукратному превышению необходимого тягового усилия, ошибка настройки не превышает 7 %.

Стабильность скорости сварки оценивалась по вышеописанной нестандартной методике. Как видно в табл. 6.6, на полностью загруженном аппарате суммарной массой 135 кг даже при дополнительной нагрузке 150 Н изменения

скорости сварки не превышают 8 %, допускаемых в ГОСТ 8713-73. На облегченном аппарате суммарной массой 82 кг изменения скорости еще меньше. Но при этом возможности привода ограничены уже по другой причине — колеса слишком легкого аппарата буксуют при дополнительной нагрузке 150 Н. Поэтому в технические условия на испытания аппарата приходится внести ограничение дополнительной тяговой нагрузки величиной 100 Н.

С другой стороны, при конструировании и эксплуатации таких аппаратов следует принимать меры для предотвращения пробуксовки. К ним относятся:

- использование обрешиненных колес,
- увеличение количества приводных колес,
- увеличение массы аппарата,
- размещение гирлянды проводов и шлангов на роликовых подвесках,
- предварительная (до сварки) раскладка проводов по свариваемому изделию, исключая их натяжение на ходу аппарата.

На рис. 6.15 приведено графическое изображение описанных зависимостей — механические характеристики $V_{св}(P_{доп})$ привода перемещения при разных заданных скоростях. Эти характеристики можно положительно оценить как достаточно жесткие.

Испытание при разных значениях питающего напряжения также не выполнялось, поскольку привод питается стабилизированным напряжением $24 \text{ В} \pm 5 \%$. По требованию ГОСТа измерялся ток якоря. Максимальное его значение составляет 3 А или 60 % от номинального для используемого двигателя.

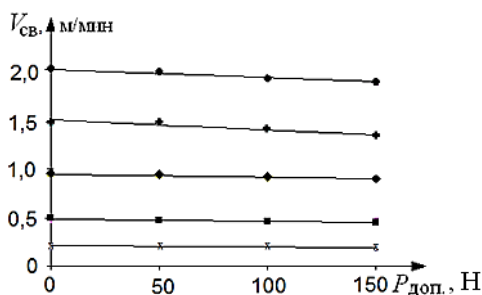


Рис. 6.15. Механические характеристики привода перемещения (полностью укомплектованный аппарат АДФ-2х630)

7. НАСТРОЙКА И АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМОМ СВАРКИ

7.1. Общие принципы настройки режима

7.1.1. Определения и набор настраиваемых параметров

Термин «регулирование», к сожалению, позволяет двоякое толкование. Поэтому для предупреждения путаницы предлагаем вместо него пользоваться двумя несовпадающими терминами — настройка и автоматическое управление. Настройка параметра — это задание его необходимого значения до начала сварки с помощью регулятора источника или другого сварочного оборудования. Автоматическое управление — это поддержание параметра в процессе сварки специальным устройством на заданном уровне (стабилизация параметра) или изменение этого параметра по наперед заданному закону (программное управление).

К настраиваемым параметрам дуговой сварки относятся:

- сварочный ток $I_{\text{св}}$ (или ток дуги $I_{\text{д}}$, если процесс не сопровождается частыми короткими замыканиями или обрывами дуги), А;
- сварочное напряжение $U_{\text{св}}$ (или напряжение дуги $U_{\text{д}}$), В;
- длина дуги $l_{\text{д}}$, мм;
- скорость подачи электродной проволоки $V_{\text{под}}$, м/мин;
- скорость сварки при автоматическом процессе $V_{\text{св}}$, м/час;
- расход защитного газа $Q_{\text{г}}$, л/мин;
- вылет электродной проволоки из токоподвода $l_{\text{в}}$, мм;
- амплитуда, частота и длительность импульсов сварочного тока.

Настройка других характеристик сварочного процесса, таких как диаметр электрода (проволоки), диаметр газового сопла, род тока и полярность дуги, состав защитного газа или флюса, имеет характер дискретный ($d_s = 2, 3, 4$ мм) или даже альтернативный (постоянный – переменный ток). Изменение таких параметров, как правило, в специальных регуляторах не нуждается и здесь не рассматривается.

7.1.2. Способы настройки режима в разных энергетических системах

Принцип настройки конвенциональных источников может быть изложен безотносительно к их устройству и виду преобразования энергии. Энергетические параметры режима сварки — ток $I_{\text{св}}$ ($I_{\text{д}}$) и напряжение $U_{\text{св}}$ ($U_{\text{д}}$) — обычно настраиваются с помощью регуляторов, воздействующих на напряжение холостого хода источника $U_{\text{х}}$ и его внутреннее сопротивление $Z_{\text{и}}$.

При ручной сварке регуляторами источника настраивается ток:

$$i_{\text{св}} = \frac{\dot{U}_{\text{х}} - \dot{U}_{\text{св}}}{Z_{\text{и}}} \quad \text{или} \quad i_{\text{д}} = \frac{\dot{U}_{\text{х}} - \dot{U}_{\text{д}}}{Z_{\text{и}}} \quad (7.1)$$

Из уравнений следует, что для увеличения тока нужно увеличить напряжение холостого хода $U_{\text{х}}$ или снизить сопротивление источника $Z_{\text{и}}$ (рис. 7.1).

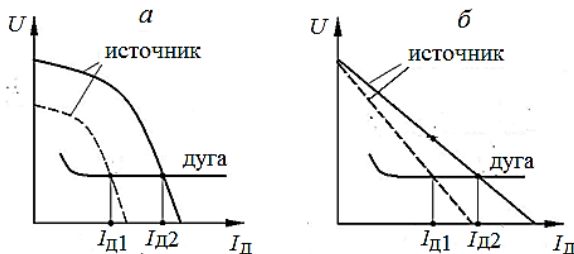


Рис. 7.1. Настройка тока при ручной сварке изменением напряжения холостого хода (а) и сопротивления (б) конвенционального источника

При механизированной сварке плавящимся электродом в системе АРДС регуляторами источника настраивается напряжение, а не ток:

$$\dot{U}_{\text{св}} = \dot{U}_{\text{х}} - i_{\text{св}} Z_{\text{и}} \quad \text{или} \quad \dot{U}_{\text{д}} = \dot{U}_{\text{х}} - i_{\text{д}} Z_{\text{и}}. \quad (7.2)$$

Настройка режима в системах автоматического управления источниками. Стабилизированный источник с обратной связью по току или напряжению позволяет поддерживать настроенное значение параметра режима в процессе сварки с необходимой точностью. Источник со стабилизацией тока показан на рис. 7.2, а. С датчика тока — измерительного шунта RS — снимается сигнал обратной связи в виде напряжения $U_{\text{дт}}$, пропорционального току $I_{\text{д}}$. Этот сигнал сопоставляется в устройстве сравнения УС с сигналом задания $U_{\text{зт}}$, и разность двух сигналов воздействует на напряжение холостого хода $U_{\text{х}}$ или сопротивление источника $Z_{\text{и}}$, а поэтому и на фактическое значение тока $I_{\text{д}}$ (рис. 7.2, б). Подобным образом при введении обратной связи по напряжению можно получить жесткие характеристики (рис. 7.2, в), с помощью которых настраивается напряжение $U_{\text{д}}$.

Настройка режима в таких источниках выполняется изменением заданного значения (уставки) $U_{\text{зт}}$ или $U_{\text{зн}}$. Например, в источнике для ручной сварки при увеличении $U_{\text{зт}}$ возрастет разность $U_{\text{зт}} - U_{\text{дт}}$, что приведет к увеличению напряжения холостого хода, а поэтому и тока — $I_{\text{д1}} \rightarrow I_{\text{д2}} \rightarrow I_{\text{д3}}$ (рис. 7.2, б). А в источнике для механизированной сварки с обратной связью по напряжению (рис. 7.2, в) при увеличении уставки $U_{\text{зн}}$ увеличится и напряжение дуги — $U_{\text{д1}} \rightarrow U_{\text{д2}}$.

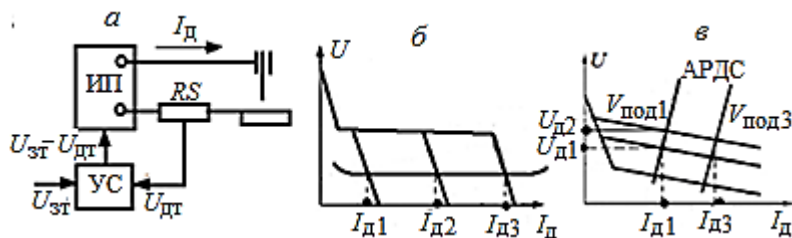


Рис. 7.2. Блок-схема (а) и внешние характеристики источников со стабилизацией тока (б) и напряжения (в)

Настройка тока и напряжения с помощью приводов подачи электродной проволоки выполняется в системах автоматического регулирования дуги АРДС и АРНД_В. На рис. 7.2, в поясняется способ настройки режима в системе АРДС. В ней при увеличении скорости подачи проволоки $V_{\text{под}}$ увеличивается и ток — $I_{\text{д}1} \rightarrow I_{\text{д}3}$. Вычисление тока при настройке (см. разд. 4.3) выполняется с помощью уравнения

$$I_{\text{д}} = \frac{V_{\text{под}}}{k_{\text{ст}}} + \frac{k_{\text{сн}}}{k_{\text{ст}}} U_{\text{д}} \quad (7.3)$$

Система АРНД_В описана в разд. 4.3.3 (см. рис.4.11). В ней для настройки напряжения изменяют уставку $U_{\text{зн}}$ в соответствии с уравнением

$$U_{\text{д}} = U_{\text{зн}} + \frac{k_{\text{ст}}}{k_{\text{рн}}} I_{\text{д}}$$

А ток в системе АРНД_В настраивают так же как при ручной сварке, изменяя напряжение холостого хода $U_{\text{х}}$ или сопротивление источника $Z_{\text{и}}$.

Настройка скорости сварки $V_{\text{св}}$ в современных сварочных аппаратах осуществляется изменением частоты вращения коллекторного двигателя. При необходимости ее стабилизацию обеспечивают обратной связью по ЭДС якоря (см. рис. 6.12). В последнем случае настройка скорости сварки выполняется изменением сигнала задания скорости $U_{\text{зс}}$ в блоке ЗС.

7.1.3. Характеристики эффективности настройки режима

В понятие эффективности настройки входят ее диапазон, плавность и точность, а также обеспечение номинального режима источника.

Номинальный ток $I_{\text{ном}}$ — главный параметр источника, который устанавливается (проектируется) производителем. В соответствии с ГОСТ 60974-1-2012 он является предельно допустимым током источника по условию термически стабилизированного состояния. Источник

для ручной сварки испытывают в перемежающемся режиме, т.е. с периодическим чередованием режимов нагрузки длительностью $t_{\text{св}}$ и холостого хода длительностью $t_{\text{х}}$ (например, при $\text{ПН}_{\text{ном}} = t_{\text{св}}/T_{\text{ц}} = 60\%$ и $T_{\text{ц}} = t_{\text{св}} + t_{\text{х}} = 5$ мин). Источник для механизированной сварки испытывают в повторно-кратковременном режиме, ($\text{ПВ}_{\text{ном}} = t_{\text{св}}/T_{\text{ц}}$ при $T_{\text{ц}} = t_{\text{св}} + t_{\text{откл}} = 10$ мин). Ряд стандартных номинальных токов по ГОСТ 10594-80 представляет собой геометрическую прогрессию с показателем 1,25 (с округлением и несколькими исключениями): 50, 80, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3150, 4000 и 5000 А. Экспериментально номинальный ток определяют при нагружении источника вместо дуги на балластный реостат. Этим самым устраняются помехи, вызываемые высокой динамичностью сварочного процесса, и повышается точность измерений.

У пользователя сварочного оборудования при испытании источника проверяют обеспечение им заявленного номинального режима, соответствующего соотношениям:

$U_{\text{ном}} = 20 + 0,04I_{\text{ном}}$ — при ручной сварке покрытыми электродами и автоматической сварке под флюсом;

$U_{\text{ном}} = 14 + 0,05I_{\text{ном}}$ — при механизированной сварке плавящимся электродом в активном защитном газе;

$U_{\text{ном}} = 10 + 0,04I_{\text{ном}}$ — при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом.

А у производителя сварочного оборудования в номинальном режиме дополнительно определяют температуру термически стабилизированного состояния — такую, которая в течение часа испытания не увеличивается больше, чем на один градус. Эта температура не должна превышать допустимую температуру нагрева обмоток и других токоведущих частей испытываемого источника.

Диапазон настройки тока или напряжения экспериментально определяют также при нагружении на балластный реостат. Эксперимент выполняют при двух крайних положениях регулировочных устройств источника — минимальном и максимальном. В обоих случаях с помощью балластного реостата подгоняют режим до параметров условной рабочей нагрузки, отвечающих вышеприведенным соотношениям, типа $U_{\text{мин}} = 20 + 0,04I_{\text{мин}}$ для ручной сварки. Качество эксперимента повышается при его совмещении со снятием статических внешних характеристик источника. В этом случае на фоне семейства внешних характеристик $U_{\text{и}} = f(I_{\text{д}})$ дополнительно наносится график условной рабочей нагрузки $U_{\text{р}} = f(I_{\text{д}})$ (рис. 7.3). На пересечениях этого графика с крайними внешними характеристиками источника получают минимальный $I_{\text{мин}}$ и максимальный $I_{\text{макс}}$ токи. Источник можно характеризовать диапазоном $I_{\text{мин}}-I_{\text{макс}}$ или кратностью настройки тока $I_{\text{макс}}/I_{\text{мин}}$. По требованиям

ГОСТ 95-77, 7012-77 и 13821-77 у трансформаторов и выпрямителей для ручной и автоматической сварки кратность настройки тока должна быть не менее 2,5–6 (для разных номинальных токов). Минимальные значения кратности относятся к переносным трансформаторам монтажного и ремонтного назначения. Названные кратности ограничены техническими возможностями настройки у конвенциональных источников. У современных тиристорных выпрямителей кратность I_{\max}/I_{\min} составляет 8–15, а у инверторных источников может достигать 100.

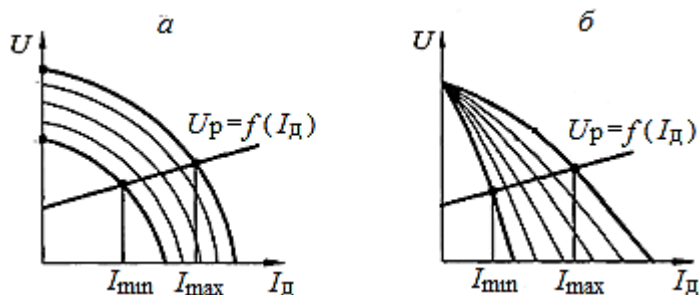


Рис. 7.3. Определение диапазона настройки тока при изменении напряжения холостого хода (а) и сопротивления (б) источника для ручной сварки

Подобным образом у источников для механизированной и автоматической сварки аппаратами системы АРДС определяют диапазон настройки напряжения $U_{\min}-U_{\max}$ и его кратность U_{\max}/U_{\min} .

Плавность настройки тока или напряжения обеспечивается плавным изменением положения регулировочных устройств. Например, механическая настройка тока в трансформаторах для ручной сварки выполняется с помощью винтового привода перемещением обмотки или магнитного шунта. В источниках с электрической настройкой (электромагнитной, фазовой или импульсной) обычно с этой целью плавно вращают рукоятку потенциометра в составе блока задания тока или напряжения. В системах числового управления, дискретного по своей сущности, шаг настройки может быть задан сколь угодно малым, например, в 1 А или в 0,1 В.

Иногда регулятор позволяет изменять U_x или Z_n только дискретно. Например, настроенное число витков обмотки может быть только целым, к тому же большое количество отпаек у этой обмотки существенно усложнило бы конструкцию. В данном случае настройка получается ступенчатой. Тогда разрыв между ближайшими значениями тока не должен превышать 7,5 % большего из этих значений. Последнее требование не распространяется на источники монтажного и бытового назначения, которые могут иметь всего 3–5 ступеней настройки. Для увеличения кратности плавную настройку иногда дополняют ступенчатой на

2–3 диапазона. При этом диапазоны настройки желательно частично перекрывать друг другом (допустим неперекрытый интервал не более 7,5 % от минимального тока диапазона больших токов).

Точность настройки оценивается величиной отклонения фактического значения параметра от установленного по шкале регулятора. Например, для тока абсолютное отклонение $\Delta I_{абс} = I_{факт} - I_{уст}$, а относительное — $\Delta I_{отн} = \frac{I_{факт} - I_{уст}}{I_{уст}} \cdot 100 \%$. Наиболее важно оценить точность настройки номинального тока $I_{ном}$, а также его минимального I_{min} и максимального I_{max} значений.

Косвенными критериями эффективности настройки можно считать интервалы изменения напряжения холостого хода U_x и сопротивления $Z_{и}$ источника, поскольку с их помощью можно рассчитать значения таких непосредственных критериев, как номинальный ток и диапазоны настройки тока и напряжения.

7.2. Автоматическое управление сварочным оборудованием

7.2.1. Развитие систем управления

Прогресс в развитии автоматических сварочных систем связан с совершенствованием элементов автоматики, и особенно с появлением управляемых силовых приборов (дресселей насыщения, тиристоров, мощных транзисторов).

Первое поколение источников имело механические регуляторы, непосредственно воздействующие на конструктивные элементы источников — обмотку, магнитопровод, реостат — от которых, в свою очередь, зависят сварочный ток и напряжение. Из первого поколения ограниченный срок службы сохраняют такие источники:

- трансформаторы типа ТДМ имеют только ручную настройку — магнитную и витковую;

- диодные выпрямители типа ВД комплектуются автоматическим выключателем или магнитным пускателем, а также измерительными приборами, но настройка режима в них выполняется ручными регуляторами, как и у трансформаторов;

- вентильные генераторы типа ГД имеют обмотки возбуждения, через магнитную систему воздействующие на сварочный ток, но значительная величина тока возбуждения затрудняет их встраивание в цепи автоматического управления.

Простейшие приводы первого поколения имеют трехфазные асинхронные двигатели и редукторы со сменными шестернями. Такие приводы также трудно встроить в цепи автоматики.

Второе поколение источников создано на основе электрически управляемых дросселей насыщения и неполностью управляемых силовых вентилей — тиристоров. Сначала их блоки управления изготавливались методом индивидуального монтажа из дискретных элементов — резисторов, конденсаторов, диодов, транзисторов, электронных ламп, а впоследствии были заменены логическими элементами, печатными платами и интегральными микросхемами. Эти блоки выполняют функции настройки режима, защиты от перегрузок, программного управления, формирования внешних характеристик за счет обратных связей.

В шланговых полуавтоматах к таким источникам придаются коллекторные двигатели подающих механизмов, укомплектованных тиристорными регуляторами частоты вращения, а в сварочных автоматах — такие же двигатели механизмов перемещения. Дроссельные и тиристорные источники объединялись с газовой аппаратурой и устройствами стимулирования дуги для расширения их технологических возможностей (генератором импульсов, осциллятором, стабилизатором, блоком питания дежурной дуги).

Ко второму поколению в настоящее время относятся (если исключить неперспективные дроссельные источники):

- тиристорные трансформаторы типа ТДФЖ, дополнительно снабженные импульсными стабилизаторами горения дуги;

- тиристорные выпрямители типов ВДГ и ВДУ, последние являются универсальными, т.е. пригодными для нескольких способов дуговой сварки;

- специализированные установки для импульсно-дуговой, аргонодуговой или плазменной сварки.

Третье поколение источников, преобладающее в настоящее время по численности, использует полностью управляемые полупроводниковые вентили — транзисторы:

- инверторные источники отличаются малыми массой и размерами и благодаря высокой частоте промежуточного преобразования имеют отличные сварочные свойства, в том числе большой диапазон, абсолютную плавность и высокую точность настройки режима, а также специальные функции, расширяющие круг технологических возможностей;

- транзисторные регуляторы — чопперы — предназначены для замены балластных реостатов в многопостовых системах, а также для комплектования конвенциональных выпрямителей и генераторов с целью придания им высоких сварочных свойств.

Современные приводы подачи и перемещения на основе коллекторных, шаговых и асинхронных частотно-регулируемых двигателей также комплектуются транзисторными преобразователями напряжения и частоты для настройки и стабилизации скорости, а также для программного управления. Адекватно соответствует таким эффективным сварочным источникам и приводам микропроцессорное управление.

Архитектура микропроцессорной системы управления шлангового полуавтомата, т.е. ее устройство, как оно воспринимается пользователем, показана на рис. 7.4. Основной системы управления служит микропроцессор МП, в его состав входят арифметико-логическое устройство АЛУ, постоянное ПЗУ и оперативное ОЗУ запоминающие устройства. Кроме того, МП комплектуется цифро-аналоговыми преобразователями ЦАП для передачи информации от МП к сварочному оборудованию и аналого-цифровыми преобразователями АЦП — для передачи сигналов обратной связи от этого оборудования к МП. Рационально снабжать МП-управлением не отдельный источник, а комплектную установку для сварки, включающую в себя источник ИП, механизм подачи проволоки ПМ и газовый клапан ГК. Иногда МП-системы снабжают еще видеотерминалом ВТ для визуального контроля информации и алфавитно-цифровым печатающим устройством АЦПУ для документирования процесса сварки.

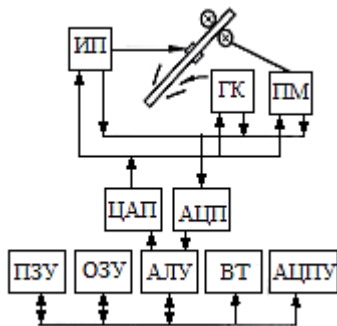


Рис. 7.4. Блок-схема МП-системы управления шланговым полуавтоматом

7.2.2. Особенности испытания прогрессивных систем управления

Выше были изложены методики испытания типовых систем автоматического управления — стабилизации тока (АРДС), напряжения (АРНД), скорости подачи и перемещения. Поэтому далее поясним, как испытывают другие системы автоматического управления, не относящиеся к типовым системам стабилизации:

- дистанционные,
- синергетические,

- экстремальные,
- адаптивные,
- программные (разд. 7.3).

Дистанционное управление (ДУ) обязательно при комплектовании установок для автоматической сварки, и желательно практически для всех остальных способов дуговой сварки. Кабель ДУ имеет длину не менее 5 м. Переносный пульт ДУ дублирует только некоторые функции стационарной панели управления источника или сварочного аппарата (включение–выключение, настройка основных параметров режима, иногда еще индикация параметров режима и управление настроечными перемещениями). Возможна также педальная настройка для корректировки тока, когда обе руки у сварщика заняты. Известны системы ДУ, в которых миниатюрные регуляторы и индикаторы монтируются в корпус сварочной горелки (*T.E.D.A.C. — torch energy display and control*).

При испытании эффективности настройки оборудования с ДУ необходимо оценить диапазон, плавность и точность настройки режима с пульта ДУ и сравнить их с полученными при настройке на основной панели управления. При этом следует иметь в виду, что ступенчатая настройка с пульта ДУ обычно не выполняется. Иногда функции местного и дистанционного регуляторов различаются. На панели управления выполняют предварительную настройку в широком диапазоне параметров (например, в выпрямителе ВДУ-306МТ при ручной сварке — тока от 30 до 350 А и при механизированной сварке — напряжения от 15 до 32 В). А с пульта ДУ в процессе сварки подстраивают режим более точно в зависимости от номера прохода и пространственного положения шва (например, у ВДУ-306МТ — в диапазонах ± 30 А и ± 3 В).

Синергетическое управление (*synergic control*) использует математическую модель сварочного процесса, т.е. систему уравнений, связывающих входные условия сварки с выходными настройками регуляторов отдельных параметров. Благодаря согласованию между собой параметров режима достигается максимальный совместный эффект в отношении качества и производительности процесса. Так, при автоматической сварке в защитном газе оператор в качестве входных условий указывает значения толщины свариваемых деталей $s_{\text{дет}}$, величины зазора между ними $\delta_{\text{зз}}$ и диаметра электрода d_3 [97]. Микропроцессор, в памяти которого хранятся уравнения модели, рассчитывает значения выходных величин, используемых далее в качестве уставок всех регуляторов:

$$V_{\text{под}} = V_{\text{под0}} + v_1 s_{\text{дет}} + v_2 \delta_{\text{зз}} + v_3 d_3 + \dots$$

$$U_x = \dots$$

$$V_{\text{св}} = \dots$$

В дополнение к математической модели, а иногда вместо нее могут использоваться таблицы соответствия. С их помощью при предусмотренных сочетаниях входных данных получаются соответствующие выходные. Например, настройка тока форсирования $I_{\text{ф}}$ при сварке покрытым электродом выполняется с помощью табл. 9.6 в зависимости от типа электродного покрытия и пространственного положения шва.

Однокнопочное управление (*oneknob control*) [98] — более ранний и относительно простой вариант синергетического. При нем сварщик указывает или настраивает только один, наиболее важный параметр режима — диаметр проволоки или (и) скорость ее подачи. Остальные параметры МП-система может вычислить с помощью хранящихся в ее памяти уравнений — $I_{\text{св}} = f(V_{\text{под}}, d_s)$, $U_{\text{св}} = f(I_{\text{св}})$, $U_x = f(U_{\text{св}}, I_{\text{св}}, \rho_{\text{и}})$ и т.д.

Испытание синергетической системы может иметь целью проверку адекватности модели реальным условиям сварки, либо оценку воспроизводимости модели в конкретных условиях производства. Поэтому испытание синергетической системы следует выполнять в два этапа. Первая задача (проверка правильности модели) может быть решена виртуально, без выполнения сварки. Для этого после задания входных условий считываются значения вычисленных уставок и проверяются на соответствие нормативным или литературным рекомендациям. Вторая задача должна решаться в технологическом эксперименте с оценкой качества полученных сварных швов (полный провар, достаточная ширина, отсутствие дефектов) при высокой производительности и хорошем внешнем виде.

Экстремальное управление — такое, при котором регулируемая величина поддерживается на максимальном или минимальном, но заранее не известном и поэтому ненастраиваемом уровне. Например, при механизированной сварке плавящимся электродом короткой дугой в углекислом газе установлено в эксперименте, что оптимальное соотношение производительности и качества достигается при максимально возможной частоте переноса капель электродного металла [99]. В то же время зависимость частоты от напряжения источника, диаметра и скорости подачи проволоки — функция сложная и неоднозначная (рис. 7.5, а), что не позволяет заранее задать ее оптимальное значение.

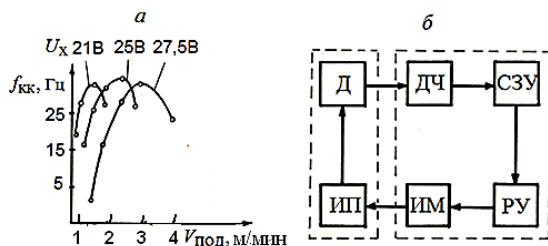


Рис. 7.5. Система экстремального управления при механизированной сварке:
 а — типичная зависимость частоты коротких замыканий каплями от параметров режима, б — блок-схема (выпрямитель ВДГ-301, Св-08Х18Н9Т Ø2 мм, 0,32 МГц, 17 л/мин)

В экстремальной системе, представленной на рис. 7.5, б, выполняют периодические изменения скорости подачи в узком диапазоне в поисках режима с максимальной частотой переноса. С этой целью объект управления «источник ИП–дуга Д» дополнен экстремальным регулятором на основе исполнительного подающего механизма ИМ. В процессе сварки датчик ДЧ фиксирует величину частоты и подает сигнал в сравнивающе-запоминающее устройство СЗУ, где фактическое значение частоты сопоставляется с измеренным ранее. В результате регулирующее устройство РУ изменяет скорость подачи ИМ на один шаг, что приводит к изменению частоты. Такие попытки повторяются с постепенным приближением к максимуму частоты, а далее — к сканированию скоростью подачи вблизи от этого максимума. В другом варианте экстремальной системы производится управляющее воздействие на напряжение источника при неизменной скорости подачи.

Оценку сварочных свойств экстремальной системы также рекомендуется выполнять в два этапа. В приведенном выше примере управления переносом сначала с помощью осциллографирования необходимо убедиться в успешном действии экстремального регулятора — выходе на максимум частоты коротких замыканий. Затем следует проверить полезное влияние экстремального управления на конечный результат — заявленную высокую производительность при низком разбрызгивании. В работе [99] при осциллографировании сварочного тока и напряжения показано, что экстремальный регулятор всякий раз выводит систему на режим с максимальной частотой переноса.

Специальная функция *QSet* (*Quick Setting* — быстрая настройка, *ESAB*) обеспечивает при сварке короткой дугой автоматическую подстройку напряжения источника к заданной скорости подачи по близкому принципу [100] (рис. 7.6). Только в качестве параметра оптимизации здесь принята не максимальная частота коротких замыканий каплями, а относительная длительность коротких замыканий $t_{\text{кк}}/(t_{\text{кк}} + t_{\text{д}}) \cdot 100\%$ ($t_{\text{кк}}/T_{\text{кк}} \cdot 100\%$). Оптимальные значения отношения $t_{\text{кк}}/T_{\text{кк}}$ укладываются в сравнительно узкий диапазон. Так, при отношении $t_{\text{кк}}/T_{\text{кк}} = 10\%$ (рис. 7.6, а), где в микроцикле образования и переноса одной капли существенно преобладает стадия дугового разряда (горячая дуга), обеспечивается значительное тепловложение в изделие и глубокое проплавление. А при отношении $t_{\text{кк}}/T_{\text{кк}} = 40\%$ (рис. 7.6, б), где тепловложение в изделие ограничено (холодная дуга), рекомендуется сваривать тонкий металл, и особенно с легкоплавкими покрытиями. Задание принятого зна-

чения $t_{\text{КК}}/T_{\text{КК}}$ выполняется потенциометром «электронный дроссель», поскольку обычно в простейших системах (не экстремальной) увеличение индуктивности приводит к показанному на рис. 7.6 увеличению длительности $t_{\text{КК}}$. В действительности же дросселя в источнике может и не быть, а показанный график нарастания и спада тока задается программированием МП-регулятора.

По одному из алгоритмов функционирования системы *QSet* сварщик при настройке задает только скорость подачи, после чего в течение нескольких секунд выполняет пробную сварку. При этом МП-регулятор постепенно изменяет напряжение источника и с помощью датчика тока непрерывно измеряет отношение $t_{\text{КК}}/T_{\text{КК}}$. Как только отношение достигнет оптимального значения, настройка заканчивается, после чего можно приступить к сварке. Оптимальное отношение обеспечивает при высокой производительности сварки малое разбрызгивание и качественное формирование шва. При такой автоматической настройке сварщик не обязан указывать МП-системе диаметр и материал электродной проволоки, тип или состав защитного газа, вылет электродной проволоки, тип разделки и пр., потому что при пробной сварке эти параметры отразятся на величине отношения $t_{\text{КК}}/T_{\text{КК}}$ и таким образом будут учтены.

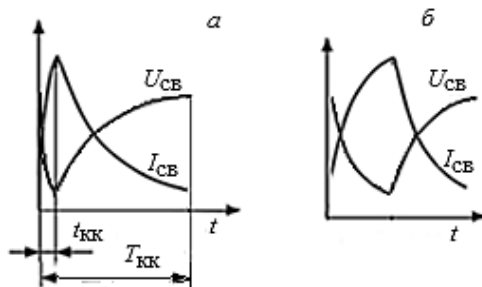


Рис. 7.6. Схематичные осциллограммы при автоматической настройке отношения $t_{\text{КК}}/T_{\text{КК}}$: а — 10 %, б — 40 %

Адаптивное управление предусматривает автоматическую корректировку структуры или параметров системы управления в зависимости от изменения внешних и внутренних условий непосредственно в процессе сварки (рис. 7.7). Такая система имеет два контура: основной и адаптации. В исходном состоянии функционирует только основной контур автоматического управления. В нем сигнал задания x приобретает в задающем устройстве ЗУ форму постоянной уставки $x(t) = x_0$ для системы стабилизации или форму функции времени $x(t) = at$ для системы программного управления. Затем сигнал задания x сопоставляется в устройстве сравнения СУ с сигналом обратной связи y . Результат сравнения Δx

усиливается в управляющем устройстве УУ и, наконец, воздействует на объект управления ОУ (дугу, источник, привод) с регулируемой величиной y . Контур адаптации вступает в действие только при появлении возмущений, на которые не реагирует основной контур. При этом устройство анализа объекта УАО обнаруживает изменение соотношения между входом и выходом объекта, вызванное внутренними возмущениями (например, изменение напряжения дуги из-за нарушения состава защитной газовой смеси). Устройство анализа входного сигнала УАВ может среагировать на внешние возмущения (например, изменение температуры воздуха). Вычислительное устройство ВУ принимает сигналы УАО и УАВ и на основе заложенных в нем критериев оптимизации с помощью исполнительного устройства ИУ изменит состав или параметры УУ. Управляющее устройство может состоять из пропорционального ПЗ, интегрирующего ИЗ и дифференцирующего ДЗ звеньев. В простейшем П-регуляторе увеличение коэффициента k_1 повысит точность управления, а уменьшение — повысит запас устойчивости. Дополнительное введение в состав УУ интегрирующего звена (ПИ-регулятор), так же как увеличение k_2 , снизит или даже устранист статическую ошибку. Дополнительное введение дифференцирующего звена (ПД- или ПИД-регулятор) или увеличение k_3 улучшит быстродействие.

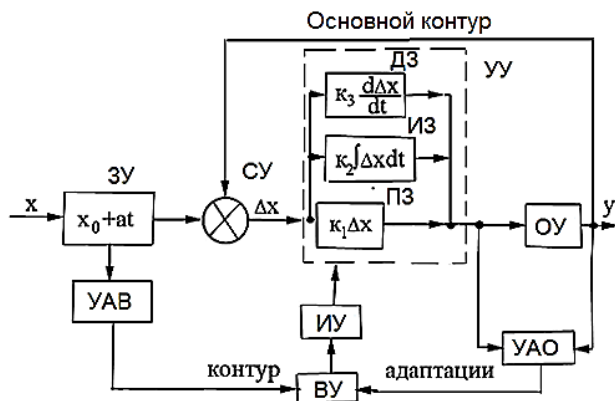


Рис. 7.7. Адаптивная система управления

Экспериментальная оценка сварочных свойств оборудования с адаптивным управлением пока еще не освоена. Поэтому ограничимся только общими соображениями по методике ее испытания. Очевидно, что предварительный эксперимент должен выполняться в благоприятных условиях функционирования при типовых возмущениях, которые отрабатываются основным (не адаптивным) контуром. И только последующие эксперименты можно производить при других возмущениях

(чрезмерный вылет электродной проволоки, изношенный токоподводящий наконечник, большая длина сварочных проводов и т.д.). Признаком высокого качества адаптивной системы станет сохранение уровня сварочных свойств при действии таких возмущений.

7.3. Программное управление режимом сварки

Здесь рассматривается только программное управление циклом сварки, т.е. последовательностью и длительностью работы отдельных устройств сварочной установки, а также изменением во времени параметров режима. Программное же управление перемещениями, т.е. траекторией движения сварочной головки и (или) свариваемого изделия, проблема объемная и довольно специфическая, здесь не обсуждается.

7.3.1. Ручная сварка покрытым электродом

Схематичная осциллограмма ручной сварки (рис. 7.8) иллюстрирует гибкое программное управление. В нем начала отдельных этапов задаются естественными процессами (коротким замыканием, возникновением дуги, обрывом) и фиксируются датчиками сварочного тока и напряжения, а заранее настроенная длительность большинства из этих этапов контролируется таймером в составе МП-системы управления. Мотивированный выбор уровней и длительностей каждого из этапов приведен в разд. 1.4. Здесь же основное внимание уделено связи между этапами, а характеристики отдельных этапов описаны кратко.

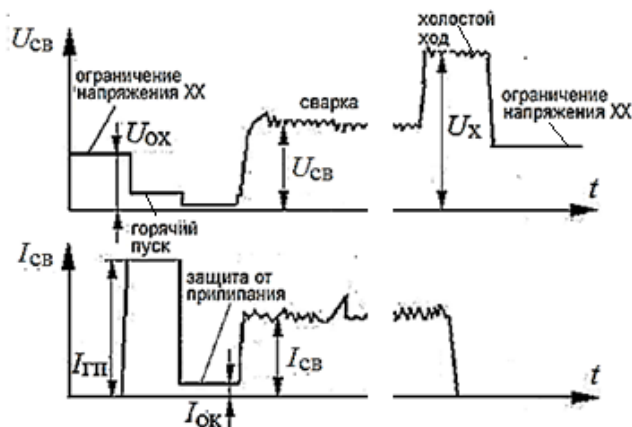


Рис. 7.8. Схематичные осциллограммы современного источника

Этап ожидания (при пониженном до безопасного уровня напряжении холостого хода).

Начало — при включении источника, окончание — при касании электродом изделия.

Ограниченное напряжение холостого хода $U_{ох}$ — не более 12 В.

Время срабатывания $t_{вкл}$ при включении полного напряжения источника — не более 0,06 с.

Этап горячего пуска (кратковременное начальное увеличение тока).

Начало — по условию ($R_{мэ} < 200 \text{ Ом}$), окончание — по условию ($t > t_{гп}$).

Ток $I_{гп} = (1,4\text{--}1,5) I_{св \text{ норм}}$.

Длительность $t_{гп}$:

- для надежного начального зажигания — 0,5–2 с,
- для устранения начальной пористости — 1–3 с,
- для увеличения начального проплавления шва — 3–5 с,
- по умолчанию — 0,5 с.

Этап защиты от прилипания электрода к изделию (снижение тока при затяжке короткого замыкания).

Начало — по условию ($I > 0$, $U < 10 \text{ В}$, $t_k > t_{ко}$), окончание — при отрыве электрода от изделия.

Ток ограничения короткого замыкания $I_{ок} = 20\text{--}50 \text{ А}$.

Длительность ограничения короткого замыкания $t_{ко} = 0,6\text{--}2,5 \text{ с}$, но больше $t_{гп}$.

Длительность защиты от прилипания — не ограничена.

Этап холостого хода после окончания сварки (сохранение высокого напряжения на случай возможного повторного зажигания).

Начало — при обрыве дуги, окончание — по сигналу таймера $t_{выкл}$.

Амплитуда — полное U_x источника.

Длительность $t_{выкл}$ — не более 1 с.

Пример оценки программного управления выполнен с осциллографированием тока и напряжения в начале и конце сварки [17]. Обычно в таком эксперименте проверяется порядок следования этапов, соблюдение вышеприведенных уровней и длительностей всех этапов, а также адекватность реакции энергетической системы на типичные возмущения (затянувшееся короткое замыкание, случайные обрывы дуги и т.д.)

В данном испытании (рис. 7.9) порядок следования этапов в основном соответствует типовому циклу по рис. 7.8. Разница заключается в наличии у выпрямителя ВДУ–306МТ дополнительной функции — этапа мягкого пуска — и отсутствии прилипания в этом эксперименте.

В этапе ожидания на межэлектродный промежуток подается сигнальное напряжение средней величиной 10 В (вырабатываемое не основным силовым источником, а системой управления). Через 0,05 с после касания электродом

изделия включается высоковольтная подпитка с током мягкого пуска $I_{мп} = 20$ А в режиме короткого замыкания. Через 0,04 с после отрыва электрода от изделия включается основной источник с тиристорным блоком — начинается дуговой интервал горячего пуска с током $I_{гп} = 105$ А. Мягкий пуск длительностью 0,6 с и горячий пуск длительностью 0,5 с обеспечили успешное зажигание дуги, после чего ток снижается до настроенного сварочного $I_{св} = 80$ А. После окончания сварки основной источник и вспомогательный с напряжением $U_x = 85$ В остаются включенными в режиме холостого хода, для того чтобы обеспечить повторное зажигание, если обрыв дуги был случайным. Поскольку повторного зажигания не понадобилось, то оба источника через 0,7 с отключились. А еще через 0,06 с повторно включился источник сигнального напряжения 10 В, обеспечивая новый безопасный режим ожидания. На этом цикл гибкого программного управления завершается.

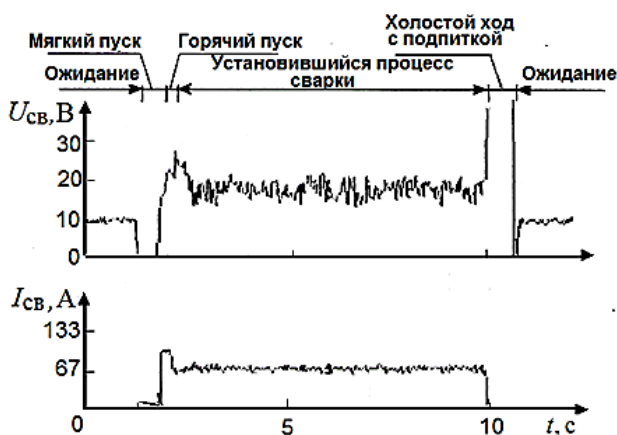


Рис. 7.9. Ручная сварка с гибким программным управлением (выпрямитель ВДУ-306МТ с МП-управлением, электрод LB52U Ø2,6 мм, 80 А, 21 В)

7.3.2. Механизированная сварка плавящимся электродом в защитном газе

Циклограмма работы полуавтомата при механизированной сварке представляет собой график, показывающий последовательность и длительность включения исполнительных устройств: двигателя подачи проволоки, сварочного источника, газового клапана, а также кнопки на горелке. Принципы организации жесткого программного управления при механизированной сварке рассмотрим на примере блока цикла БУСП-2, встраиваемого в корпус полуавтомата (рис. 7.10). Предусмотрено три разных цикла в зависимости от длины швов.

1) В цикле сварки длинных швов (рис. 7.10, а) при нажатии на кнопку запускается газовый клапан, и начинается этап предварительной

подачи газа. Затем одновременно включаются источник и двигатель подачи, и начинается этап установления процесса, а потом и этап собственно сварки в течение длительного ненастраиваемого периода. Для прекращения сварки снова нажимают на кнопку. При этом начинается этап растяжки дуги, для чего выключается питание двигателя и выполняется его электродинамическое торможение. Однако источник остается включенным, в результате чего дуга продолжает гореть, растягиваясь до естественного обрыва. Затем источник выключается, но клапан продолжает работать в течение этапа последующей подачи газа.

2) В цикле сварки коротких швов (рис. 7.10, б), например, прихваток, кнопку в процессе сварки удерживают включенной. При ее нажатии, так же как и при выполнении длинных швов, последовательно проходят этапы предварительной подачи газа, установления процесса и сварки. Но для завершения сварки кнопку отпускают, в результате пойдут этапы растяжки и последующей подачи газа.

3) В точечном цикле (рис. 7.10, в) длительность этапа сварки задается при настройке. После нажатия на кнопку процессы протекают так же, как и в ранее рассмотренных вариантах, но завершение сварки происходит по команде таймера по истечении заранее настроенного времени $t_{\text{точ}}$.

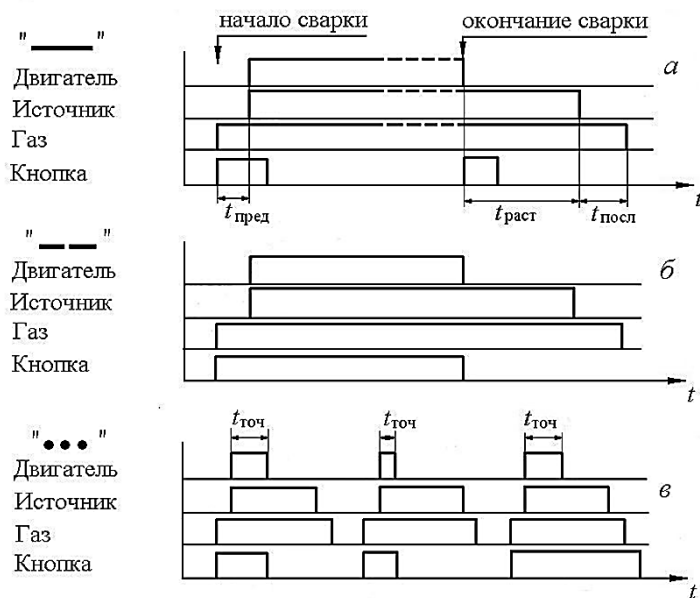


Рис. 7.10. Циклограммы механизированной сварки в защитном газе при выполнении длинных (а), коротких (б) и точечных (в) швов

Системой управления могут выполняться и другие функции, расширяющие технологические возможности полуавтомата:

- регулируемый разгон двигателя и горячий пуск при установлении сварочного процесса (см. разд. 2.4),

- импульсная подача энергии для электрического управления переносом электродного металла,

- импульсная подача проволоки для механического управления переносом или формированием шва,

- плавное снижение тока для заварки кратера,

- подача мощного импульса тока в конце сварки для сбрасывания последней капли.

Выбор уровней и длительностей отдельных этапов цикла выполнен в технологическом эксперименте по осциллограммам тока и напряжения. Производилась наплавка в углекислом газе на пластину из низкоуглеродистой стали проволокой Св-08Г2С диаметром 0,8–1,6 мм на токах от 70 до 350 А. В табл. 7.1 сведены параметры этапов, признанные оптимальными для экспериментальной модели подающего механизма ПДГО-512 с выпрямителем ВДУ-306МТ. Для сравнения приведены также литературные данные.

Этап предварительной подачи газа.

Начало — при нажатии кнопки на горелке, окончание — по сигналу таймера $t_{\text{пред}}$.

Длительность $t_{\text{пред}}$:

- для защиты начального участка шва в зависимости от мощности дуги 0,5–2 с,

- по умолчанию — 0,5 с.

Этап установления процесса стимулируется горячим пуском источника и плавным разгоном подающего механизма.

Начало — по сигналу таймера $t_{\text{пред}}$, окончание — с установлением дуги.

Длительность горячего пуска $t_{\text{гп}}$:

- установленная — 0,01–0,03 с,

- фактическая по длительности короткого замыкания на осциллограмме — 0,02–0,05 с.

Ток горячего пуска $I_{\text{гп}}$:

- для проволоки диаметром 0,8–1,6 мм амплитуда тока короткого замыкания — 350–700 А.

Длительность разгона подачи электродной проволоки $t_{\text{раз}} = 0,1–2$ с (проверяется по осциллограмме напряжения якоря двигателя, как показано на рис. 7.11).

Двухступенчатый разгон:

— начальная скорость $V_{\text{нач}} = 1,7$ м/мин до касания проволокой изделия,

— быстрый разгон в течение $t_{\text{раз}} = 0,3$ с по сигналу датчика тока.

Этап снижения скорости подачи при завершении процесса может вводиться для плавной заварки кратера (эффективен только при сварке тонкими проволоками при токе до 200 А):

Начало — при отпускании или повторном нажатии кнопки, окончание — по сигналу таймера $t_{\text{спад}}$.

Длительность $t_{\text{спад}}$ — до 5 с.

Конечное значение скорости подачи $V_{\text{кон}} = 0,9$ м/мин.

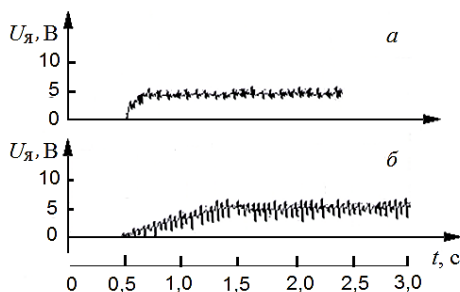


Рис. 7.11. Разгон подающего механизма при настроенной длительности $t_{\text{раз}} 0,1$ с (а) и 1 с (б) (подающий механизм ПДГО-512, $V_{\text{под}} = 3$ м/мин)

Таблица 7.1.

Выбор параметров цикла механизированной сварки в углекислом газе (подающий механизм ПДГО-512)

Параметр цикла	По литературным данным	Проверено в технологическом эксперименте	Диапазоны настройки ПДГО-512 с ВДУ-306МТ
Длительность предварительной подачи газа $t_{\text{пред}}$, с	0,5–2	0,5–2	0,5
Длительность горячего пуска $t_{\text{гп}}$, с	—	0,01–0,05	0,01
Длительность нарастания скорости подачи $t_{\text{раз}}$, с	0,2–2	0,1–0,5	0,3
Длительность спада тока $t_{\text{спад}}$, с	0–5	0–5	0–5

Длительность растяжки дуги $t_{\text{раст}}$, с	0–5	0,05–0,5	0,05
Длительность подачи газа после сварки $t_{\text{посл}}$, с	2–10	1–10	1–10
Длительность постановки точки $t_{\text{точ}}$, с	1–25	1–10	1–25

Этап растяжки дуги (эффективен на тонких проволоках).

Начало — при отпускании или повторном нажатии кнопки (или по сигналу таймера $t_{\text{спад}}$), окончание — по сигналу таймера $t_{\text{раст}}$.

Длительность растяжки $t_{\text{раст}}$:

— для проволок диаметром 0,8–1,6 мм от 0,05 до 0,5 с (при малой $t_{\text{раст}}$ проволока приваривается к шву, при большой — к токоподводящему наконечнику),

— по умолчанию — 0,05 с.

Кратковременный импульс для сбрасывания последней капли (с целью облегчения следующего установления процесса):

— амплитуда импульса тока — $(1,5–2)I_{\text{св}}$,

— длительность импульса — 0,003–0,01 с.

Этап подачи газа после сварки.

Начало — после растяжки дуги и сбрасывающего импульса, окончание — по сигналу таймера $t_{\text{посл}}$ и выключении газового клапана.

Длительность $t_{\text{посл}}$:

— для защиты шва — 1–25 с (в зависимости от мощности режима и химической активности свариваемого металла),

— по умолчанию — 3 с.

Функция «сварка точками» проверялась при горении дуги на месте с варьированием диаметра электрода, тока и времени постановки точки $t_{\text{точ}}$ от 1 до 10 с (рис. 7.12). Диаметр точки изменялся от 7 до 36 мм, а выпуклость — от 2 до 6 мм. Если использовать эту функцию и для сварки коротких швов, например, прихваток длиной до 100 мм, то оправдано увеличение предела настройки $t_{\text{точ}}$ до 25 с.

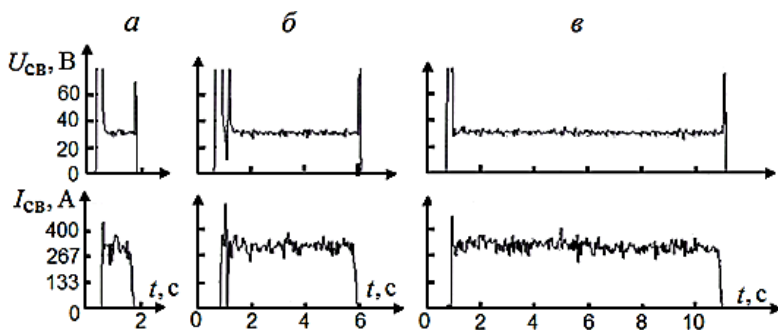


Рис. 7.12. Сварка точками при $t_{точ} = 1$ (а), 5 (б) и 10 (в) с
(ПДГО-512 + ВДУ-306МТ, Св-08Г2С Ø1,6 мм, 4 м/мин)

Пример оценки программного управления полуавтомата выполнен с помощью осциллограмм тока и напряжения для проверки правильного порядка следования этапов и соблюдения настроенных уровней и длительностей всех этапов. С помощью осциллограммы (рис. 7.13), полученной в режиме выполнения длинных швов, поясним порядок и результаты такого испытания [17].

Видно, что все этапы цикла проходят в верной последовательности (сравнить с рис. 7.10, а), хотя и отличаются бóльшим совершенством. После нажатия кнопки на горелке идет этап предварительной подачи газа длительностью $t_{пред} = 0,5$ с. Затем запускаются основной источник и высоковольтная подпитка в режиме холостого хода, а также привод подачи с низкой начальной скоростью $V_{нач} = 1,7$ м/мин. В момент касания проволокой изделия основной источник с тиристорным выпрямительным блоком кратковременно переходит в режим горячего пуска с длительностью $t_{гп} = 0,01$ с и током 600 А. Одновременно начинается быстрое нарастание в течение $t_{раз} = 0,3$ с скорости подачи до настроенного значения $V_{под} = 4$ м/мин. После этого полуавтомат переходит к установившемуся режиму. Завершение сварки начинается при повторном нажатии кнопки. При этом привод останавливается, и при продолжающем работать источнике идет растяжка дуги длительностью $t_{раст} = 0,05$ с. Непосредственно перед выключением источник выдает мощный импульс тока для сбрасывания последней капли с электрода. Затем идет этап последующей подачи газа длительностью $t_{посл} = 3$ с.

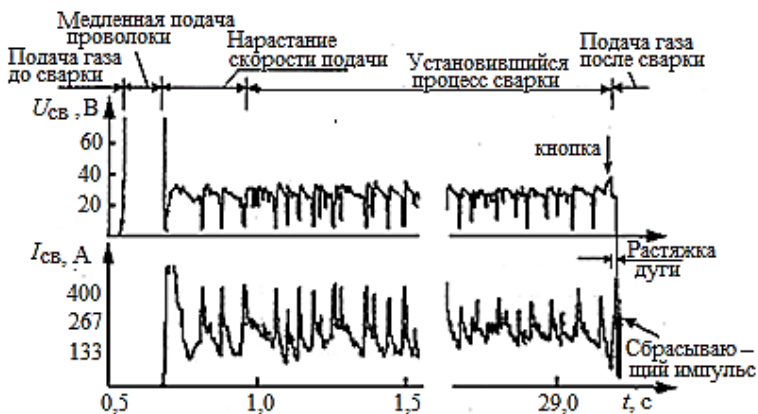


Рис. 7.13. Механизированная сварка с жестким программным управлением циклом (ПДГО-512 + ВДУ-306МТ, Св-08Г2С Ø1,6 мм, 4 м/мин, 250 А, 23 В, CO_2 , 16 л/мин)

7.3.3. Автоматическая сварка плавящимся электродом

Циклограмма автоматической сварки дополнительно обеспечивает еще и перемещение аппарата по оси стыка со сварочной скоростью $V_{св}$ (рис. 7.14). Настроечные или следящие приводы поперечного и вертикального перемещений включаются в программу редко, поэтому на циклограмме не показаны.

При автоматической сварке под флюсом (рис. 7.14, а) вне цикла, т.е. до начала сварки, выполняют настроечные включения приводов, устанавливая автомат в начале шва, закорачивая электрод на изделие, и засыпают флюс (показано штриховыми линиями). Этап установления процесса начинается при нажатии кнопки «пуск». При этом включаются источник и привод подачи проволоки на подъем. После появления дуги привод реверсируется на подачу проволоки вниз, и запускается механизм сварочного перемещения — идет длительный не настраиваемый по времени этап собственно сварки. При нажатии кнопки «стоп» сначала выключается механизм перемещения автомата, затем замедляется и выключается механизм подачи проволоки и, наконец, выключается источник. В результате последовательно протекают этапы заварки кратера и растяжки дуги, длительность которых настраивается заранее. Флюсовый затвор может выключаться вне цикла.

Циклограмма автоматической сварки в защитном газе (рис. 7.14, б) отличается наличием этапов предварительной и последующей подачи газа, а также тем, что при использовании более тонкого электрода обычно установление процесса начинается не с подъема, а с медленного опускания проволоки.

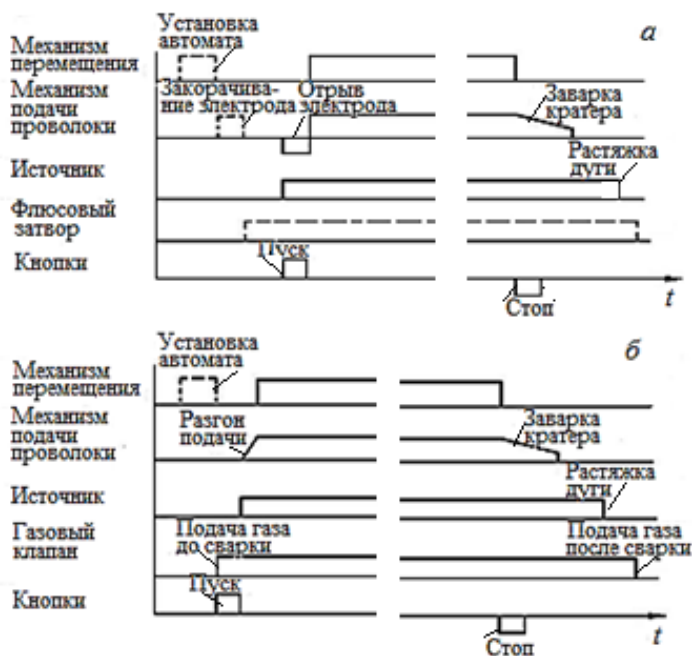


Рис. 7.14. Циклограммы автоматической сварки под флюсом (а) и в защитном газе (б)

Пример оценки программного управления аппарата для автоматической сварки позволяет убедиться в согласованной работе при зажигании и гашении дуги всех исполнительных устройств. Для этих целей используют многоканальные регистраторы или запоминающие осциллографы. В качестве примера на рис. 7.15 приведены записи четырехканального осциллографа TDS-2004C при работе в режиме настройки (без сварки) двухдугового трактора АДФ-2х630.

Здесь зафиксированы моменты включения и выключения двух источников, привода перемещения, а также общего привода подачи двух проволок. Видно, что при пуске одновременно включаются оба источника и оба привода. При завершении процесса сначала останавливается привод перемещения — имитируется заварка обоих кратеров. Затем останавливается привод подачи проволок — начинается этап растяжки обеих дуг, после чего выключаются оба источника. После этого следует кратковременный импульс подачи проволоки, чтобы предотвратить приваривание проволок к токоподводящим мундштукам.

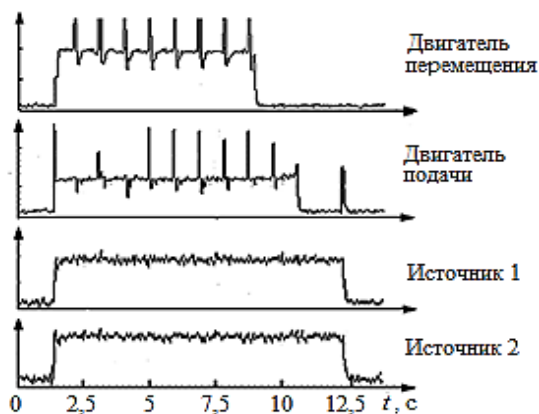


Рис. 7.15. Контроль циклограммы по работе приводов и источников (АДФ-2х630 + два ВДУ-1250, $V_{под} = 3$ м/мин, $V_{св} = 1$ м/мин)

Другие подробности программного управления автомата рассмотрим с помощью осциллограмм напряжения и тока обеих дуг (рис. 7.16). Выполняется сварка под флюсом таврового соединения одновременно двумя дугами.

При нажатии кнопки «пуск» включаются привод подачи проволок и одновременно с ним оба источника при повышенном напряжении для надежного установления процесса. Токи возникают через 0,4–0,5 с в моменты касания проволоками изделия. Установление процесса происходит со 2–3 касания еще через 1–2 с. При зажигании обеих дуг включается привод перемещения, а источники снижают напряжение до настроенного сварочного значения. Если при установлении процесса не зажглась или в течение сварки погасла хотя бы одна дуга, сварка прекращается. Две последние функции — задержка включения привода перемещения и экстренное прекращение процесса — могут быть отключены, например, при необходимости сварки одной дугой. После нажатия кнопки «стоп» при остановке перемещения и замедлении подачи в обеих дугах в течение 2,5 с идет заварка кратера с плавным естественным снижением тока и пропорциональным току искусственным снижением напряжения. Затем останавливается привод подачи, и в течение 0,3 с идет растяжка дуги с резким спадом тока. После этого источники выключаются.

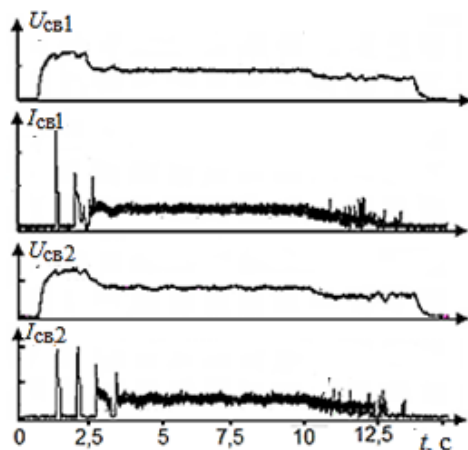


Рис. 7.16. Двухдуговая автоматическая сварка под флюсом
(АДФ-2х630 + два ВДУ-1250, $V_{под} = 6$ м/мин,
 $V_{св} = 0,5$ м/мин, $U_x = 40$ В, Св-08Г2С Ø2 мм,
флюс АН-348А, $I_{01} = 415$ А, $U_{01} = 33$ В, $I_{02} = 395$ А, $U_{02} = 34$ В)

7.3.4. Аргонодуговая сварка неплавящимся электродом

Циклограмма установки для аргонодуговой сварки показана на рис. 7.17. Этап предварительной подачи газа выполняется для облегчения зажигания дуги и защиты начала шва. Зажигание дуги осуществляется высоковольтным разрядом или коротким замыканием методом мягкого пуска. Этап плавного нарастания основного тока обеспечивает постепенный нагрев электрода и изделия. Далее в течение длительного времени идет этап сварки при заранее установленном токе. Этап спада тока необходим для заварки кратера. Этап последующей подачи газа нужен для защиты электрода, а также шва в процессе его кристаллизации и остывания.

Управление циклом с помощью кнопки на горелке может выполняться в двух вариантах: с двух- и четырехтактным циклом. При двухтактном цикле, когда нажимают кнопку (стрелка вниз), последовательно проходят этапы предварительной подачи газа, зажигания, нарастания тока и собственно сварки. А для завершения цикла кнопку отпускают (стрелка вверх), в результате установка переходит к этапам спада тока и последующей подачи газа. Такой цикл предпочтителен при сварке коротких швов. Четырехтактный цикл идет в следующем порядке: после нажатия кнопки следуют подача газа до сварки, зажигание и мягкий пуск. Горящая при этом малоамперная дуга может использоваться для поиска места начала сварки. После отпускания кнопки следует нараста-

ние тока и длительная сварка. При втором нажатии кнопки начинается спад тока, а с момента отпускания кнопки идет время подачи газа после сварки. Такой цикл рекомендуется при выполнении длинных швов.



Рис. 7.17. Типовая циклограмма аргондуговой сварки

Технологическое обоснование выбора уровней и длительностей на отдельных этапах цикла выполнялось с учетом сведений из литературных источников, а также паспортных данных современных установок. При проектировании выпрямителя ВДУ-506МТ эти данные положены в основу алгоритма МП-управления (табл. 7.2).

Этап предварительной подачи газа.

Начало — при нажатии кнопки на горелке, окончание — по сигналу таймера $t_{\text{пред}}$.

Длительность $t_{\text{пред}}$:

- для защиты начального участка шва и электрода в зависимости от мощности дуги и типа шва — от 0,5 до 5 с,
- по умолчанию — 1 с.

Этап мягкого пуска при сварке на постоянном токе вместо высоковольтного разряда (см. разд. 1.4.2).

Начало — в момент касания электродом изделия или по сигналу таймера $t_{\text{пред}}$.

Окончание:

- в двухтактном цикле — по сигналу таймера $t_{\text{мп}}$,
- в четырехтактном цикле — при первом отпускании кнопки.

Ток мягкого пуска:

- для контактного зажигания без оплавления основного и электродного металла $I_{\text{мп}} = (7-14) d_s$,
 - по умолчанию для электродов диаметром 1–4 мм $I_{\text{мп}} = 28-30$ А.
- Длительность мягкого пуска $t_{\text{мп}}$ в двухтактном цикле — от 0,5 до 2 с при токе $I_{\text{мп}}$ соответственно от 40 до 20 А.

Этап зажигания дуги переменного тока высоковольтным разрядом (см. разд. 3.3).

Амплитудное напряжение осциллятора или возбудителя 8–10 кВ.

Длительность работы высоковольтного источника не более 1 с.

Интервал следования попыток зажигания не менее 10 с.

Этап нарастания тока после мягкого пуска до настроенного сварочного.

Длительность $t_{\text{нар}}$:

— при автоматической сварке в зависимости от времени разгона автомата — до 5 с,

— по умолчанию — 0,5 с.

Этап спада тока для заварки кратера.

Начало — при переключении кнопки, окончание — по сигналу таймера $t_{\text{спад}}$ или при втором отпускании кнопки (в четырехтактном цикле).

Таблица 7.2.

Выбор параметров цикла аргонодуговой сварки на постоянном токе

Параметр цикла	По литературным данным	Выбор в технологическом эксперименте	Диапазоны настройки в базовой модели ВДУ-506МТ
Длительность предварительной подачи газа $t_{\text{пред}}$, с	0,5–5	1–5	0,5–5
Ток мягкого пуска $I_{\text{мп}}$, А	$(0,1–0,3)I_{\text{сву}}$	$(7–14) d_3$ или 28–30 А (при $d_3 = 1–4$ мм)	$(0,1–0,3)I_{\text{сву}}$
Длительность мягкого пуска $t_{\text{мп}}$, с	—	0,5–2	0,5–10
Длительность нарастания тока $t_{\text{нар}}$, с	0–5	0,5–2	0–2
Длительность спада тока $t_{\text{спад}}$, с	0–25	2–5	0–25
Длительность подачи газа после сварки $t_{\text{посл}}$, с	0,5–60	2–5	0,5–25
Ток нижнего уровня $I_{\text{св2}}$, А	$(0,1–1)I_{\text{сву}}$	$(0,1–1)I_{\text{сву}}$	$(0,1–1) I_{\text{сву}} \geq 30 \text{ А}$
Ток паузы $I_{\text{п}}$, А	$(0–1)I_{\text{сву}}$	$(0,1–1)I_{\text{сву}}$	$(0,1–1) I_{\text{сву}} \geq 30 \text{ А}$
Длительность импульса $t_{\text{и}}$, с	0,04–2	0,1–2	0,1–1
Длительность паузы $t_{\text{п}}$, с	0,04–2	0,1–2	0,1–1

Длительность равномерного спада тока $t_{\text{спад}} = 2–5$ с при сварочном токе от 200 до 350 А, при спаде по пологой кривой — в 1,5–2 раза больше.

Этап подачи газа после сварки (с учетом защиты кристаллизующегося и остывающего шва и вольфрамового электрода ниже температур их активного взаимодействия с атмосферным воздухом).

Начало — по сигналу таймера $t_{\text{спад}}$ или при втором отпускании кнопки, окончание — по сигналу таймера $t_{\text{посл}}$.

Длительность $t_{\text{посл}}$:

— при сварке большинства металлов $t_{\text{посл}} = 0,5-5$ с,

— при сварке титановых сплавов — до 25 с (при остывании шва ниже 400°C).

Функция предварительной настройки двух режимов (*minilog*) рекомендуется, например, с целью попеременной сварки то в нижнем, то в вертикальном положениях. В процессе сварки переход от одного режима к другому осуществляется толчковым, не более 0,5 с, нажатием кнопки на горелке (*click control*). Ток нижнего уровня $I_{\text{св2}}$ настраивается от 10 до 100 % от ранее установленного тока нормального уровня $I_{\text{сву}}$.

Сварка пульсирующей дугой с жестким программным чередованием импульсов и пауз тока предназначена для управления формированием шва на тонком металле (подробней см. разд. 10.4.1). Ток паузы $I_{\text{п}}$ настраивается от 10 до 100 % от ранее установленного тока импульса $I_{\text{сву}}$. Длительности импульса $t_{\text{и}}$ и паузы $t_{\text{п}}$ настраиваются в диапазоне 0,04–2 с.

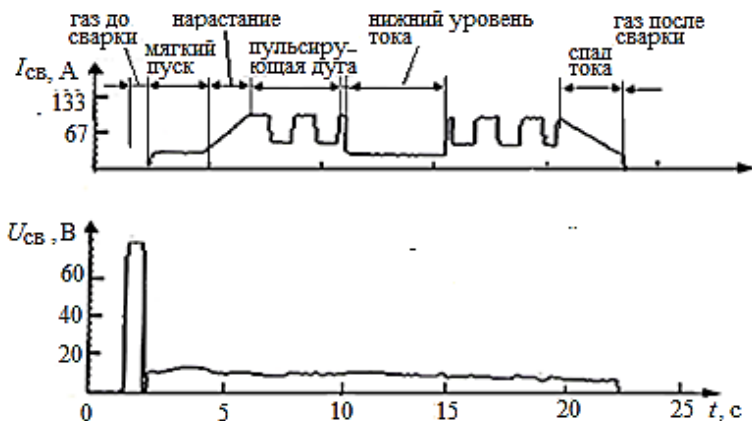


Рис. 7.18. Аргонодуговая сварка пульсирующей дугой с двухрежимной настройкой (ВДУ-306МТ, электрод ЭВЛ $\varnothing 1,6$ мм, 100 А, 11 В)

Пример оценки программного управления при аргонодуговой сварке в четырехтактном режиме показан на рис.7.18. На выпрямителе ВДУ-306МТ вы-

полнялось зажигание, поддержание и гашение дуги прямой полярности в аргоне на пластине из стали 12Х18Н9Т толщиной 6 мм с использованием электродов ЭВЛ диаметром 1,6 мм. С помощью осциллограмм тока и напряжения можно убедиться, что все этапы цикла проходят в верной последовательности и с точным соблюдением настроенных уровней и длительностей: $t_{\text{пред}} = 1$ с, $I_{\text{мп}} = 30$ А, $t_{\text{мп}} = 2,5$ с, $t_{\text{нар}} = 2$ с, $I_{\text{сву}} = 100$ А, $I_{\text{св2}} = 30$ А, $t_{\text{спад}} = 3$ с, а также параметров сварки пульсирующей дугой: $I_{\text{п}} = 50$ А, $t_{\text{п}} = 1$ с и $t_{\text{н}} = 1$ с.

7.4. Оформление панели управления сварочной установки.

Современное сварочное оборудование, как правило, комплектуется МП-системами управления. Например, в состав системы управления выпрямителя ВДУ-506МТ входит микроконтроллер PIC18F452 (8-бит, 40 МГц, ПЗУ слов 32 Кбайт, 2–5,5 В). С его помощью:

- задаются алгоритмы управления нескольких способов сварки,
- производится настройка, программное управление и стабилизация параметров режима,
- формируются комбинированные внешние характеристики,
- выполняются специальные функции,
- реализуется управление переносом электродного металла и формированием шва,
- выполняется запись и чтение из памяти нескольких режимов.

Испытание сложного сварочного оборудования должно включать в себя проверку всех функций и возможностей, заявленных в описании системы управления. Начальное представление об этих возможностях дает внешнее оформление панели управления источника или сварочного аппарата.

Панель управления аргонодуговой установки *Master TIG (Kemppi)* приведена в качестве примера на рис. 7.19. Эта установка имеет в своем составе источник для сварки на постоянном токе униполярными импульсами (DC) и разнополярными импульсами (AC). Семейство источников *Master* имеет в качестве основы унифицированный инвертор на биполярных транзисторах с изолированным затвором *IGBT*. А приспособление отдельных моделей для обслуживания конкретным способом сварки обеспечивается только заменой специализированных схем управления. Панель управления названной установки содержит нижеперечисленные элементы и обеспечивает выполнение следующих функций:

1. индикация напряжения сети;
2. индикация перегрева;
3. индикация вентиляции;

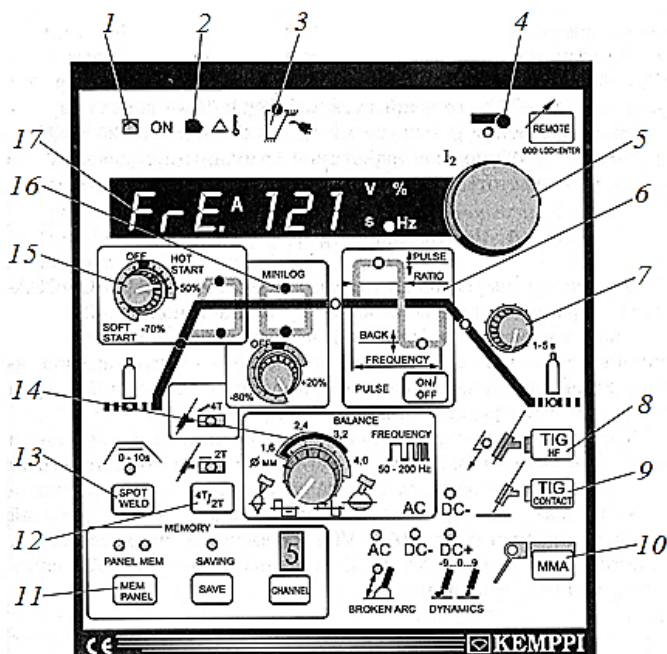


Рис. 7.19. Панель управления установки для аргонодуговой сварки
Master TIG 2500 DC/AC (Kemppi, Финляндия)

4. индикация пульта дистанционного управления;
5. настройка высвеченного на дисплее параметра;
6. панель импульсного режима с настройкой импульсного и базового тока, частоты и длительности импульсов;
7. настройка спада тока (1...5 с);
8. выбор аргонодуговой сварки с осциллятором (TIG HF);
9. выбор аргонодуговой сварки с мягким пуском (TIG Contact);
10. панель сварки покрытым электродом (MMA) с выбором переменного или постоянного тока (AC, DC), полярности дуги (– или + на электроде), сварки прерывистой дугой (Broken arc), настройкой форсирования дуги (– 9...0...+ 9);
11. панель запоминания и хранения режимов (10 каналов);
12. выбор типа цикла (двух-, четырехтактный);
13. выбор сварки точками с настройкой времени (до 10 с);
14. панель разнополярных импульсов с настройкой частоты (50...200 Гц) и баланса (очистка-проплавление) для разных диаметров электрода (1,6...4 мм);

15. панель пускового тока (в отношении к основному току: мягкий пуск до -70% , горячий пуск до $+50\%$);

16. панель двухрежимной настройки (в добавление к основному току: ток I_2 от -80% до $+20\%$);

17. дисплей с указанием настраиваемой величины и ее значения (в примере — частота 121 Гц).

Интерактивная панель в составе многофункционального контроллера образует более совершенную систему управления шланговым полуавтоматом (рис. 7.20). Дисплей 2 предлагает меню для настройки условий сварки и выбора параметров режима 1. Текст, в том числе на русском языке, содержит девять строк с вариантами выбора. Левая кнопка 6 предназначена для листания страниц меню. Левая ручка 9 используется для перемещения курсора по дисплею. Две правые ручки 3 и 4 служат для настройки параметра в выделенной строке за счет выбора из предлагаемого списка. Правая кнопка 5 используется для подтверждения выбора. Пять кнопок 7 выполняют разные функции на разных страницах меню. Название этих функций возникает в черном прямоугольнике 8 над соответствующей кнопкой S1–S5. Для обмена данными с центральным компьютером или другим контроллером имеется разъем 10 для USB-подключения с переносной Flash-памятью.

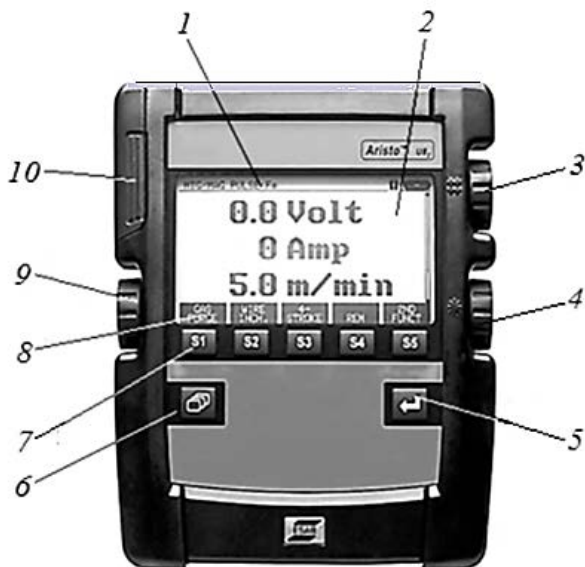


Рис. 7.20. Панель управления U8/W8 полуавтоматов Aristo (ESAB, Швеция)

Рассмотрим пример пользования главным меню (построчно и с вариантами выбора):

1. Способ сварки (*MIG/MAG*, *MMA*, *TIG*).
2. Метод сварки (например, вид переноса *Short-Spray* — с короткими замыканиями или струйный).
3. Автоматическая настройка *QSet* (вкл – выкл).
4. Синергетическая линия (например, стандартная).
- 5 Тип проволоки (например, стальная).
6. Защитный газ (например, $\text{Ar} + 18\% \text{CO}_2$).
7. Диаметр проволоки (например, 0,9 мм).
8. Конфигурация (язык, пароль для внесения изменений, корректировка циклограммы и т.д.).
9. Инструменты (коды ошибок, оценка качества сварки по колебаниям параметров режима, производственная статистика и т.д.).

Рассмотрим также под-меню настройки режима для механизированной сварки (*MIG/MAG*). Для нового режима по отдельности настраиваются напряжение источника, скорость подачи, индуктивность дросселя и все параметры циклограммы. Возможна быстрая настройка посредством указания только номера ранее подобранного режима. Список стандартных режимов в памяти контроллера содержал к 2012 г. более 230 синергетических линий, которые продолжают пополняться. Они разработаны для различных сочетаний типа основного металла (низкоуглеродистая, нержавеющая и двухслойная стали, алюминиие-магниевый и алюминиие-кремниевый сплавы, сталь с покрытием), типа защитного газа (CO_2 , Ar , $\text{Ar} + 18\% \text{CO}_2$, $\text{Ar} + 2\% \text{O}_2$, He , $\text{Ar} + \text{He} + \text{O}_2$) и диаметра проволоки (0,6–1,6 мм), которые должны быть указаны в основном меню.

8. ПЕРЕНОС ЭЛЕКТРОДНОГО МЕТАЛЛА ПРИ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ И АВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРКЕ

8.1. Феноменология процесса переноса при механизированной и автоматической сварке

8.1.1. Механизм капельного переноса электродного металла

При сварке плавящимся проволочным электродом его металл нагревается теплом, выделяющимся на активном пятне дуги (анодном или катодном), расположенном на торце электрода, иногда и на боковых поверхностях вблизи от торца. Перенос жидкого электродного металла в сварочную ванну происходит в основном в виде капель. Значительно меньшая часть (не более 15 % при токе до 500 А) переносится в виде пара или аэрозоля. От характера плавления электродного металла, размеров и характера движения переносимых через межэлектродный промежуток капель зависят ход и результаты сопутствующих переносу металлургических процессов (окисление компонентов электродного металла, насыщение его газами, образование ванны и т.д.).

Механическое воздействие на каплю, приводящее к ее отрыву от электрода и переносу в ванну, определяется балансом нескольких сил (рис. 8.1).

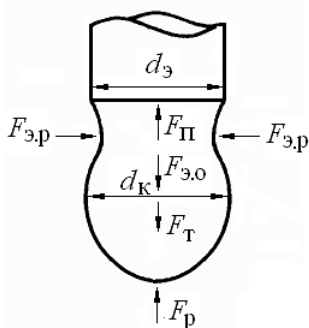


Рис. 8.1. Силы, действующие на каплю

1) Сила тяжести $F_т$ зависит от диаметра капли $d_к$. Эта сила способствует переносу электродного металла в ванну при сварке в нижнем пространственном положении шва, индифферентна при сварке на вертикальной поверхности и препятствует переносу при сварке потолочного шва.

2) Сила реактивного давления F_p создается выделением паров и газов с поверхности активного пятна на торце электрода, поэтому стремится отбросить каплю от ванны. Она зависит от мощности дуги и степени перегрева капли.

3) Сила поверхностного натяжения F_{π} на границе жидкой капли и окружающей ее газовой среды стремится уменьшить площадь поверхности капли и придать ей сферическую форму. Эта сила препятствует отделению капли от электрода, но после образования шейки между ними быстро снижается.

4) Электродинамическая сила F_z вызвана взаимодействием сварочного тока с собственным магнитным полем дуги, и поэтому пропорциональна квадрату тока. Ее радиальная составляющая $F_{эр}$ стремится пережать шейку капли, а осевая составляющая $F_{зо}$, возникающая из-за искривления линий тока, направляет каплю в сторону сварочной ванны.

В разных условиях сварки учитывают и другие воздействия:

- плазменных потоков, направленных от электродов в сторону столба дуги,
- потока защитного газа, истекающего из сопла горелки,
- электрического взрыва шейки капли после ее сильного сужения,
- взрыва перегретой капли из-за внутреннего газовыделения.

8.1.2. Виды переноса

В зависимости от размеров и характера движения каплей различают следующие виды переноса [53, 101–104]: с коротким замыканием, крупнокапельный, мелкокапельный, струйный и вращательно-струйный.

Перенос с коротким замыканием капли на ванну (рис. 8.2, а) происходит в том случае, когда длина дуги l_d меньше диаметра капли d_k . Микроцикл переноса при этом состоит из двух частей — на стадии дугового разряда появляется и вырастает крупная капля, которая переключает межэлектродный промежуток, а на стадии короткого замыкания часть ее перетекает в ванну. Такой процесс характерен для сварки в углекислом газе при низком напряжении источника.



Рис. 8.2. Виды капельного переноса

Крупнокапельный перенос (рис. 8.2, б) при относительно длинной дуге характеризуется диаметром капли, значительно превышающим диаметр электрода ($d_k > 1,5d_e$). Здесь капля отрывается от электрода в основном под действием силы тяжести. Это не самый благоприятный характер переноса — капля при длительном ее формировании перегревается и хаотически раскачивается, что может привести к ее выбросу за пределы ванны и нарушению процесса сварки. Такой перенос приемлем только при сварке в нижнем положении.

Мелкокапельный перенос (рис. 8.2, в) характеризуется размером $d_k = (0,7-1,5)d_e$, поскольку отрыв капли происходит здесь гораздо раньше благодаря преимущественно действующей электродинамической силе. Траектория движения такой капли близка к оси электрода. Такой характер переноса считается благоприятным.

Струйный перенос (рис. 8.2, г) возникает при значительном увеличении плотности тока. Благодаря этому активное пятно дуги охватывает не только торец, но и боковую поверхность электрода, которая также оплавляется. В результате конец электрода приобретает форму конуса, с вершины которого жидкий металл стекает мелкими порциями, образующими жидкую струю. При этом перенос становится четко направленным в сторону ванны, разбрызгивание уменьшается, глубина проплавления увеличивается, а формирование шва улучшается. Это наиболее благоприятный вид переноса, особенно при сварке в вертикальном и потолочном положениях.

Вращательно-струйный перенос (рис. 8.2, д) наблюдается при еще более высоком токе, и особенно в газовых смесях с высокой теплоемкостью. Внешне он проявляется в виде спирального искривления струи, что приводит к увеличению разбрызгивания и даже к снижению пространственной устойчивости. Поэтому такой перенос используют только при необходимости существенного повышения производительности.

8.1.3. Влияние характера переноса на сварочный процесс

С видом и параметрами переноса связаны устойчивость процесса, разбрызгивание электродного металла, формирование шва и производительность сварки.

Устойчивость процесса сварки зависит от характера переноса потому, что рост и особенно отрыв капли от электрода являются сильными возмущающими воздействиями. Для каждого вида переноса установлены интервалы режимов с высокой устойчивостью. Так, при сварке в Т.И.М.Е.-смеси (65 % Ar, 26,5 % He, 8 % CO₂, 0,5 % O₂), (рис. 8.3) в 1 интервале идет перенос с технологическими короткими замыканиями, в 3 интервале — струйный перенос, а в 5 интервале — вращательно-струйный [108]. Между интервалами с четко выраженным характером

переноса находятся переходные 2 и 4 интервалы, например со смешанным крупно-мелкокапельным переносом. При таком нерегулярном переносе устойчивость процесса обеспечить особенно трудно.

Устойчивости при переносе с технологическими короткими замыканиями была рассмотрена в разд. 4.5. Но даже при крупнокапельном переносе без короткого замыкания в момент отделения капли от электрода происходит сначала быстрое укорочение, а затем резкое удлинение дуги, которое может привести к ее длительному обрыву. Очевидно, что при мелкокапельном и тем более струйном переносе амплитуда таких возмущений снижается, а устойчивость процесса повышается.

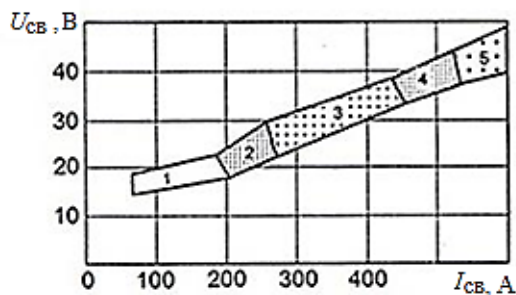


Рис. 8.3. Области режимов с характерными видами переноса при Т.И.М.Е.-процессе [108] (проволока Св-08Г2С $\varnothing 1,2$ мм)

Разбрызгивание металла зависит, прежде всего, именно от характера переноса [107]. Электродный металл интенсивно разбрызгивается при крупнокапельном переносе, но наиболее сильно при смешанных видах переноса в переходных 2 и 4 интервалах режимов (рис.8.3). Мелкие брызги ($d_k < 0,2d_s$) образуются из материала разрушающейся при переносе перемычки между крупной каплей и электродом или в результате взрыва капли расширяющимися внутри нее газами. Но доля мелких капель в общей массе разбрызгиваемого металла не превышает 10 %. Средние брызги ($d_k < d_s$) могут возникнуть при взрыве крупной капли, если летят за пределы ванны. Крупные брызги ($d_k > d_s$) возникают из-за их выбрасывания при несоосном расположении капли на электроде, что наблюдается при сварке в активных газах, а также при сварке в положениях, отличных от нижнего. Такие брызги образуются редко, но их доля в общей массе разбрызгиваемого металла может превышать 70 %. Они прочно привариваются к основному металлу за пределами шва, и существенно затрудняют послесварочную очистку сварного соединения. Как следует из данных работы [53], дополнительные трудозатраты на зачистку готового сварного изделия и сварочной горелки составляют соответственно 20–40 и 10–15 % от трудоемкости сварочных работ.

Формирование сварного шва связано с характером переноса в первую очередь из-за влияния переноса на устойчивость. Но даже при устойчивом процессе перенос крупной капли вызывает деформацию и даже расплескивание сварочной ванны, что может привести к прожогу или непровару. Особенно остро стоит проблема зависимости качества формирования от характера переноса при сварке в вертикальном и потолочном положении, где стекание сварочной ванны обычно провоцируется переносом крупной капли. Большинство приемов улучшения формирования шва сводятся к получению спокойной невозмущенной ванны, а это достигается при регулярном мелкокапельном или струйном переносе.

Производительность плавления электродного металла при разных видах переноса различна. Так, сварка с технологическими короткими замыканиями обычно выполняется на низких и средних токах (не более 250 А) с весовой производительностью не более 5 кг/час. С другой стороны, вращательно-струйный перенос, обычно реализуемый в газовых средах с высокой теплоемкостью, таких например, как *T.I.M.E.*-смесь, при скорости подачи до 30 м/мин, обеспечивает производительность около 18 кг/час.

Весовая производительность наплавки Q_n и характеристики переноса f_k и d_k находятся в таких зависимостях от параметров режима:

$$\left. \begin{array}{l} V_{\text{ПОД}} \uparrow \rightarrow I_{\text{СВ}} \uparrow \rightarrow V_{\text{ПЛ}} \uparrow \\ \qquad \qquad \qquad \downarrow \end{array} \right\} Q_{\text{H}} \uparrow$$

При механизированной и автоматической сварке для увеличения тока увеличивают скорость подачи электродной проволоки, что естественным образом приводит к увеличению скорости ее плавления. Это и объясняет повышение весовой производительности и линейной скорости сварки. Одновременно при этом увеличивается частота образования и переноса капель, и наблюдается изменение характера переноса по порядку показанных на рис. 8.2 видов (см. также рис. 8.3).

Итак, следует говорить не о зависимости производительности от характера переноса, а только о связи их друг с другом, поскольку производительность и перенос зависят от одних и тех же факторов.

8.1.4. Общие принципы управления переносом

Воздействия на перенос имеют целью снижение размера и скорости движения капель, придание переносу регулярного мелкокапельного или струйного характера и точное направление капель в ванну. По своей физической природе эти приемы можно разделить на технологические, электротехнические и механические.

Технологические приемы здесь только перечислены без подробного их анализа из-за иной целевой установки работы.

1) Обязательно использование чистой или омедненной проволоки без следов ржавчины, окалины и других загрязнений для предотвращения взрывного переноса. Нежелательно применение проволок с высоким содержанием газообразующих компонентов (в стальной проволоке — углерода).

2) При сварке углеродистых и низколегированных сталей в углекислом газе режим принимают с учетом соотношения $U_{св} = 14 + 0,05I_{св}$, желательно за пределами «запретного» интервала 200–350 А.

3) Переход от прямой полярности дуги к обратной способствует более спокойному переносу.

4) При сварке в аргоне и его смесях увеличение скорости подачи выше 5–6 м/мин, и тем самым тока выше критического значения, обеспечивает струйный перенос.

5) Использование защитных смесей аргона с углекислым газом (не более 30 % CO_2) при сварке сталей способствует измельчению капель.

6) Нанесение микродозами галогенидов щелочно-земельных и щелочных металлов на поверхность электродных проволок обеспечивает контрагирование дуги и измельчение капель. Введение микродозами редкоземельных металлов снижает силы поверхностного натяжения, что также способствует измельчению капель.

7) При сварке порошковой проволокой капля покрыта шлаковой пленкой, как правило, снижающей силы поверхностного натяжения и уменьшающей размер капли.

Электротехнические приемы улучшения переноса оказывают воздействие преимущественно на электродинамическую силу. Они будут подробно рассмотрены в разд. 8.3 и 8.4, поэтому здесь только названы.

1) Введение дросселя в сварочную цепь при сварке с технологическими короткими замыканиями уменьшает воздействие электродинамической силы на каплю и тем самым снижает разбрызгивание.

2) «Электронный дроссель» в современных источниках обеспечивает программное нарастание и снижение тока для инициирования регулярного переноса и уменьшения размеров капель.

3) При импульсно-дуговой сварке в аргоне программное управление с помощью пиковых импульсов тока вызывает регулярное сбрасывание капель с электрода, и тем самым обеспечивает мелкокапельный перенос.

4) При сварке в углекислом газе периодические искусственные провалы тока запускают механизм переноса капли за счет технологических коротких замыканий и этим повышают частоту и регулярность переноса.

5) При сварке в углекислом газе с помощью современных источников с высоким быстродействием организуется управление переносом каждой капли по сложной программе на всех стадиях микроцикла (например, в системе *STT*).

6) При импульсных воздействиях продольным электромагнитным полем электродинамическая сила периодически увеличивается, что способствует регулярному мелкокапельному переносу и уменьшению разбрызгивания.

Механические приемы улучшения переноса заключаются в периодических силовых воздействиях на электрод или каплю.

1) При вибродуговой наплавке механические колебания мундштука приводят к периодическим замыканиям проволоки на изделие и регулярному переносу капель.

2) При импульсной подаче электродной проволоки регулярный перенос происходит в момент приближения или касания капель сварочной ванны, причем лучшие результаты достигаются при сочетании приемов импульсной подачи проволоки и тока.

8.1.5. Методы изучения переноса электродного металла

К таким методам относятся кино- и видеосъемка, осциллографирование сварочного тока и напряжения, а также взвешивание капель, искусственно выделенных из дуги.

Скоростная киносъемка при частоте до 4000 кадров в секунду позволяет зафиксировать не менее 20 последовательных фаз (кадров) образования даже мелкой капли. При этом с высокой точностью определяются диаметр, скорость движения и частота образования капель при любом виде переноса [53].

Схема видеосъемки дуги с капельным переносом теньвым методом представлена на рис. 8.4, *а* [109]. He–Ne лазер используется для подсветки поля съемки с целью устранения слепящего действия высокотемпературной дуги. Лазер формирует тонкий (0,8 мм) монохроматический (с длиной волны 0,6 мкм) световой луч. С помощью коллиматора, состоящего из двух линз и настраиваемого фильтра, получается параллельный пучок света диаметром 16 мм, который направляется к дуге.

Сварочная часть с дугой отделена от оптики с обеих сторон защитными стеклами. Изображение межэлектродного промежутка линзой передается на экран. Следующий фильтр устраняет световое излучение дуги, но пропускает монохроматическое излучение лазера. Теневое изображение межэлектродного промежутка передается в высокоскоростной видеоанализатор движения (до 1000 кадров в секунду), который представляет изображение в замедленном виде. Этот

сигнал записывается видеокамерой и подается на монитор для кадрового просмотра, а также для измерения размеров и скоростей образования и движения капель.

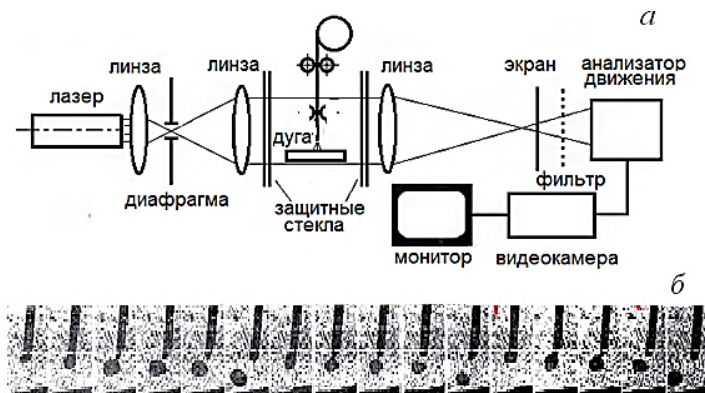


Рис. 8.4. Видеосъемка сварочного процесса: а — функциональная схема, б — крупнокапельный перенос (проволока ER70S6, Ø1 мм, Ag+5 % O₂, 166 А, 26 В)

Более совершенная аппаратура для видеосъемки дугового процесса с частотой 2000 кадров в секунду использовалась в работе [110] и позволила получить достаточно четкое изображение электрода, капли и поверхности ванны (рис. 8.4, б).

Осциллографирование сварочного тока и напряжения позволяет изучать крупнокапельный перенос и процесс с технологическими короткими замыканиями, для которых колебания тока и напряжения являются адекватными откликами на колебания длины дуги. Для иллюстрации отобрана осциллограмма (рис. 8.5), на которой проявляются оба вида переноса.

На верхней кривой по наличию провалов на графике $U_{св}(t)$ удастся определить длительность стадий короткого замыкания каплей $t_{кк}$. А в интервале между такими провалами измеряется длительность образования капли в течение стадии дугового процесса $t_{д}$. На нижней кривой $I_{св}(t)$ лучше проявляются характеристики крупнокапельного переноса без коротких замыканий — длительность образования капли $t_{обр.к}$ и длительность ее движения после отрыва от электрода $t_{дв.к}$. На этом же рисунке можно определить длительность микроцикла переноса капель $T_{к} = t_{обр.к} + t_{дв.к}$ и длительность интервала следования коротких замыканий $T_{кк} = t_{д} + t_{кк}$. О регулярности переноса можно судить по малому разбросу нескольких отмеченных на рисунке интервалов $T_{к}$. Но обычно перенос характеризуют обратными величинами: частотой переноса капель $f_{к} = 1/T_{к.ср}$ и частотой коротких замыканий каплями $f_{кк} = 1/T_{кк.ср}$.

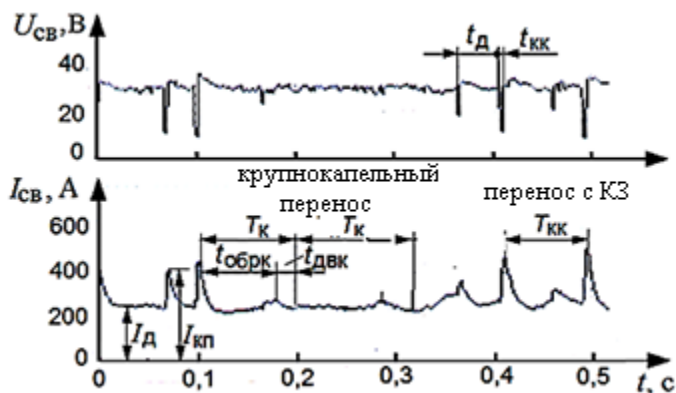


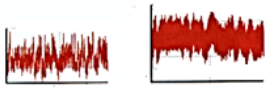
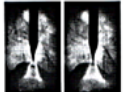
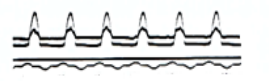

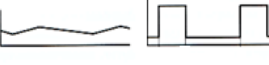
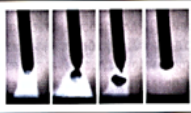
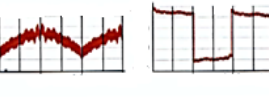



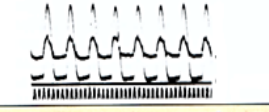

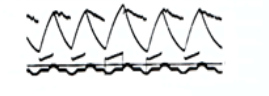

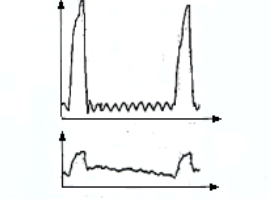
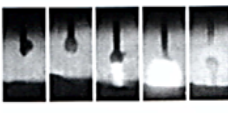
Рис. 8.5. Смешанный перенос при сварке в углекислом газе (BC-420+Урал-3, Св-08Г2С Ø1,6 мм, 300 А, 29 В, 0,75 мГц)

При осциллографировании тока удается зафиксировать пиковое значение тока короткого замыкания $I_{кп}$ и установившееся значение тока на стадии дугового процесса $I_{д}$. При анализе графика тока становится понятно, что среднее значение сварочного тока $I_{св}$, которое обычно наблюдается на показывающих (стрелочных и цифровых) приборах, всегда выше тока дуги ($I_{кп} > I_{св} > I_{д}$). Подобным образом, сварочное напряжение на показывающих приборах всегда ниже обнаруживаемого на осциллограмме напряжения устойчиво горящей дуги ($U_{к} < U_{св} < U_{д}$).

Осциллограммы импульсно-дуговой сварки так же дают исчерпывающую информацию при изучении управляемого переноса. Но в большинстве процессов с мелкокапельным и струйным переносом осциллографирование не эффективно из-за трудности визуальной идентификации на осциллограммах моментов переноса каплей. Поэтому особенно полезно при изучении переноса совмещение видеосъемки с осциллографированием (см. рис.8.8). Техника такого эксперимента с синхронным включением высокоскоростной (2000 кадров в секунду) видеокамеры *PCI 8000S Motion Scope* и запоминающего осциллографа (20000 измерений в секунду) описана в фундаментальной работе [8]. А в табл. 8.1 из работы [209] этих же авторов приведено несколько примеров анализа переноса электродного металла с помощью такой аппаратуры. При синхронном сопоставлении движения капли с ходом электрических процессов выявляются важные закономерности переноса. Так, в примере № 2 видно, что при сварке в потолочном положении точная подача капли вверх обеспечивается именно мощным пиковым импульсом тока.

Таблица 8.1

Изучение переноса электродного металла при синхронизации видеосъемки и осциллографирования

№ п/п	Характеристика процесса сварки	Осциллограмма процесса сварки	Перенос металла в дуге (кино или видеок кадры)
Процессы с пространственно устойчивой дугой			
1	Струйный перенос (Ar, обратная полярность, $I_{св} > I_{кр}$)		
2	Управляемый мелкокапельный перенос (Ar, Св-AMг6 1,6 мм обратная полярность потолочное положение, $I_{св} < I_{кр}$, 100 Гц)		
3	Управляемый мелкокапельный перенос (82% Ar+18% Co2, Св-08Г2С 1,2 мм обратная полярность $I_{св} < I_{кр}$ 20 Гц подмогильные импульсы)		
4	Прерывисто-струйный перенос (82% Ar+18% CO2, Св-08Г2С 1,2 мм, обратная полярность, 16 Гц)		
5	Струйный перенос (CO2, Св-08Г2С, 1,2 мм, прямая полярность, $I_{св} > I_{кр}$)		
6	Струйный перенос (CO2, активированная проволока Св-08Г2С, 1,2 мм, прямая полярность, $I_{св} > I_{кр}$, 100 Гц)		
Процессы с пространственно неустойчивыми дугами			
7	Перенос с технологическими короткими замыканиями (CO2, Св-08Г2С, 1,2 мм, обратная полярность, 50 Гц)		
8	Управляемый перенос (CO2, Св-08Г2С, 1,2 мм, обратная полярность)		

Взвешивание капель, образующихся при расплавлении электродной проволоки, дает представление о характере переноса капель при условии их полного выделения из дуги и несмешивания с металлом ванны. Для надежного выделения капель дугу с плавящимся электродом поддерживают на массивной медной или графитовой пластине, установленной вертикально в поддоне с водой. Здесь капли падают в воду и быстро застывают. Затем капли собирают и просушивают, далее сортируют по фракциям с помощью нескольких сит и, наконец, взвешивают. Более естественные условия переноса наблюдаются при вертикальном расположении электрода и горизонтальном – диска-контрэлектрода (см. рис. 9.3, а). Но для полного выделения капель в этом случае приходится принимать специальные меры, например, быстрое вращение диска.

В работе [111] описана методика выделения капель в эксперименте, имитирующем наплавку. Здесь дуга между электродной проволокой и графитовым диском горит под флюсом, причем диск вращается под дугой с линейной скоростью до 500 м/час. Поэтому капли, почти не деформируясь и не сливаясь между собой, остаются под слоем флюса. Затем их выделяют из флюса, освобождают от шлака и сортируют по фракциям. На рис.8.6 приведены результаты взвешивания таких фракций. Автор работы [111] отмечает небольшое отличие соотношения массовых долей от закона нормального распределения.

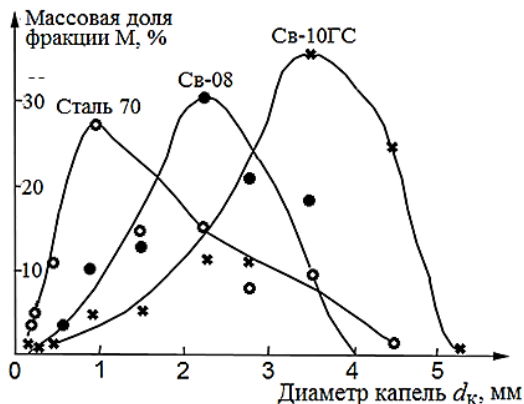


Рис. 8.6. Ситовый анализ капель при автоматической наплавке под флюсом в зависимости от марки проволоки (постоянный ток, прямая полярность, 410 А. 39 В, флюс АН-348А)

8.2. Непосредственные критерии переноса при механизированной и автоматической сварке

8.2.1. Сварка без коротких замыканий

Диаметр d_k , масса m_k и частота переноса f_k капель — непосредственные критерии именно *процесса* переноса, а не только его *результата*, как например коэффициент разбрызгивания. Экспериментальные и расчетные закономерности изменения этих критериев, полученные при анализе баланса сил, действующих на каплю, приведены в работе [112]. Например, диаметр капель d_k увеличивается при увеличении диаметра электрода и при снижении тока и вылета электрода из токоподвода, а в случае сварки стальной проволокой также при переходе от аргона в качестве защитного газа к гелию и углекислому газу. При сварке алюминиевой и особенно титановой проволокой d_k выше, чем при сварке стальной.

Типичная зависимость размера капель от тока приведена на рис. 8.7 [113]. Как видно, в интервале токов 100–150 А перенос крупнокапельный — средний диаметр капель d_k составляет от 3 до 3,5 мм. Начиная с тока 165 А, называемого критическим $I_{кр}$, диаметр капель скачком снижается до 0,9–1,1 мм, а частота f_k становится выше 100 Гц, что позволяет квалифицировать перенос как струйный или мелкокапельный.

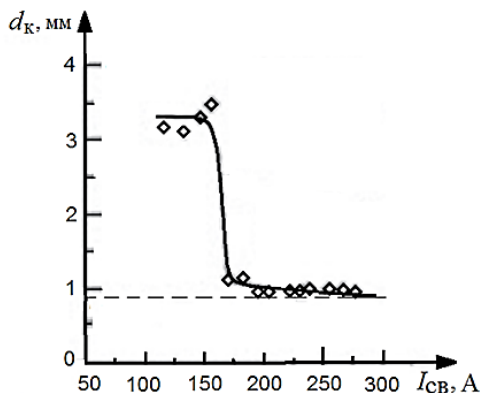


Рис. 8.7. Изменение характера переноса при увеличении сварочного тока (инверторный источник Miller Maxtron 450 CC/CV + подающий механизм Miller S-70, проволока ER70S-6 Ø0,9 мм, Ar + 10 % CO₂)

Рассмотрим особенности фиксирования названных критериев в зависимости от вида переноса.

Крупнокапельный перенос при сварке в углекислом газе — типичный вид переноса при использовании так называемой длинной дуги. Как из-

вестно, удлинение дуги обеспечивается настройкой сравнительно высокого напряжения источника — $U_{и} > 25\text{--}30\text{ В}$.

Приведем значения некоторых критериев переноса, полученных в массовом исследовании при автоматической сварке проволокой Св-08Г2С Ø2 мм [114]. В этом эксперименте использовалась скоростная киносъемка камерой СКС-1М (4000 кадров в секунду). В табл. 8.2 отобраны только результаты режимов без технологических коротких замыканий. Такому условию для электрода диаметром 2 мм отвечают режимы с напряжением более 30 В и током более 360 А. Видно, что диаметр капле составляет 2,3–4,4 мм, что превышает диаметр электрода в 1,15–2,2 раза. Это дает основание квалифицировать перенос как крупнокапельный. Размер капле увеличивается при снижении скорости подачи (и тока), а также при увеличении напряжения источника (и начальной длины межэлектродного промежутка в каждом микроцикле существования одной капли). Длительность образования капле $t_{обр.к}$ находится в типичных зависимостях от параметров режима — прямой от U_x и обратной от $V_{под}$ — и составляет от 14 до 192 мс. Длительность движения капле при отрыве от электрода $t_{дв.к}$ составляет не более 10 % длительности микроцикла. Частота f_k переноса капле также зависит от $V_{под}$ и U_x . С увеличением тока, точнее, скорости подачи, частота монотонно растет. Это объясняется не только увеличением весового расхода проволоки, но также измельчением капле.

Таблица 8.2.

Непосредственные критерии переноса при автоматической сварке в углекислом газе длинной дугой (выпрямители ВС-600 и ВС-1000, проволока Св-08Г2С Ø2 мм) [114]

Напряже- ние холо- стого хода U_x , В	Скорость подачи $V_{под}$, м/мин	Диа- метр капель d_k , мм	Длитель- ность обра- зования ка- пель $t_{обр.к}$, мс	Длитель- ность дви- жения ка- пель $t_{дв.к}$, мс	Частота перено- са f_k , Гц
32	2,4	3,80	156,5	11,5	6
37	3,1	4,35	191,9	8,1	5
32	4,7	3,60	68,35	3,15	14
39		3,80	78,3	5,1	12
38	6,0	3,35	44,3	3,4	21
42		3,90	67,7	3,8	14
50		3,45	49,1	3,5	19
38	9,0	3,34	28,4	1,9	33
42		2,34	19,1	1,7	48
38	12,4	3,45	23,4	1,6	40
50		2,34	14,0	1,4	65

Крупнокапельный перенос при сварке в аргоне — не самый благоприятный, но вполне приемлемый вид переноса. Это обусловлено сравнительно спокойным характером горения дуги, а в нижнем положении шва еще и соосным с электродом движением капли. Однако на малых токах при высоком напряжении длительное горение дуги приводит к образованию чрезмерно крупных капель, что может неблагоприятно отразиться на качестве шва. Особенно явно проявляется этот недостаток при плавлении алюминиевой проволоки, где легкая капля может превышать своими размерами диаметр электрода в 3–4 раза (рис. 8.8). Как видно, перенос таких капель обнаруживается и по всплескам на осциллограмме напряжения. Для приведенного примера длительность образования капли $t_{\text{обр.к}}$ около 0,3 с, а частота переноса $f_k = 3,3$ Гц [110]. По приведенным кинограммам размер капель к моменту переноса достигает $d_k = 4,2$ мм, что соответствует массе отдельной капли $m_k = 104$ мг.

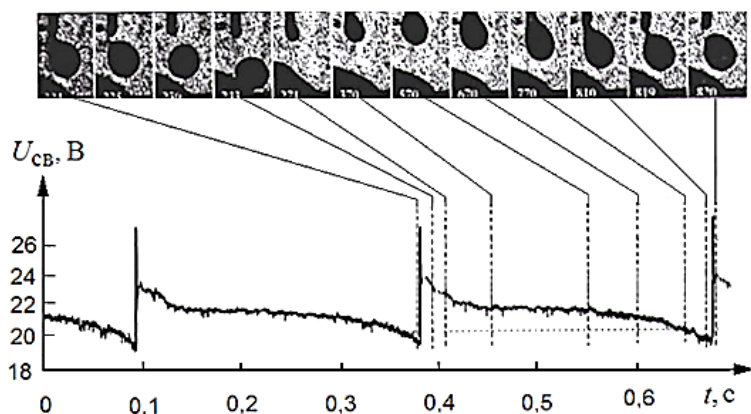


Рис. 8.8. Крупнокапельный перенос в аргоне
(алюминиевая проволока А5.10-88 Ø1,2 мм [110])

Струйный перенос — наиболее благоприятный вид перехода электродного металла в сварочную ванну — наблюдается при сварке дугой прямой и обратной полярности в аргоне, а также его смесях с углекислым газом. При сварке в чистом углекислом газе дугой прямой полярности струйный перенос достигается за счет нанесения на стальную проволоку поверхностно-активных веществ.

Критический ток $I_{\text{кр}}$ — непосредственный критерий струйного характера переноса. В действительности, он зависит в основном от свойств сварочных материалов, а при изменениях электрических характеристик сварочной цепи изменяется мало. Поэтому при проверке пригодности сварочного оборудования для поддержания струйного переноса

са достаточно только обнаружения такого тока при сварке ($I_{\text{сву}} \geq I_{\text{кр}}$) без выполнения видеосъемки или осциллографирования.

Типичные значения критического тока при сварке в аргоно-кислородной смеси приведены на рис. 8.9. Критический ток $I_{\text{кр}}$:

— возрастает с увеличением диаметра d_3 и снижением вылета l_6 электродной проволоки [25];

— увеличивается при добавках к аргону углекислого газа (не более 20–30 % CO_2 , поскольку при больших добавках заметно возрастает разбрызгивание электродного металла) [110];

— зависит от материала проволоки (для алюминиевой он существенно ниже, для медной немного выше, чем для низкоуглеродистой стали [8, 107].

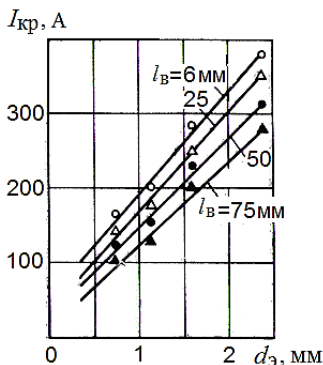


Рис. 8.9. Зависимость критического тока $I_{\text{кр}}$ от диаметра d_3 и вылета l_6 электродной проволоки [25] (низкоуглеродистая проволока, $\text{Ar}+1\% \text{O}_2$, обратная полярность)

Поскольку резкий переход к струйному переносу при увеличении тока объясняется возникающим при этом перевесом электродинамической силы над силой поверхностного натяжения, то легко объяснить обобщенная зависимость величины критического тока от коэффициента поверхностного натяжения σ и диаметра электрода d_3 [115] —

$$I_{\text{кр}} \sim \sqrt{\sigma d_3}.$$

Отметим также менее значительные, но в отдельных случаях важные факторы воздействия характеристик оборудования на ток $I_{\text{кр}}$.

1) Струйный перенос возникает после установления дугового процесса не сразу, а с некоторой задержкой — до 15 с. Обычно в начале сварки перенос имеет нерегулярный крупнокапельный характер и сопровождается значительным разбрызгиванием. В работе [116] задержку при сварке дугой обратной полярности объясняют нестабильным поло-

жением катодного пятна на изделии, в свою очередь вызванным нестабильностью электронной эмиссии с непрогретой еще сварочной ванны. Особенное значение для более раннего и стабильного струйного переноса имеет тип внешней характеристики источника. При пологом наклоне характеристики струйный перенос устанавливается быстро и сохраняется до конца сварки.

2) При погружении дуги со струйным переносом в ванну увеличиваются глубина проплавления и скорость сварки, снижается разбрызгивание и улучшается формирование шва. Но одновременно укорачивается дуга, поэтому при использовании неуправляемых конвенциональных источников жидкая струя часто касается поверхности ванны. Такие короткие замыкания сводят на нет вышеназванные достоинства погруженной струйной дуги. Иное дело инверторный источник с функцией *EWM-Force Arc*, имеющий очень высокое быстродействие. Он может не иметь индуктивности в сварочной цепи, поэтому короткие замыкания струи на ванну быстро прерываются и не успевают оказать негативного воздействия на перенос.

8.2.2. Сварка с технологическими короткими замыканиями

Механизм и параметры переноса при сварке короткой дугой поясним с помощью кинограммы и осциллограммы тока, приведенных в работе [117] (рис. 8.10). По мере подачи и плавления электрода в течение 94 мс (от 792 до 980 кадра) длина дуги сократилась от 5 до 0,5 мм, а диаметр капли увеличился до 2,5 мм. Напряжение дуги U_d при этом, естественно, уменьшилось, но общее сварочное напряжение благодаря автоматической стабилизации напряжения источника оставалось неизменным — $U_{св} = 27$ В. Избыток напряжения расходуется на увеличившихся вылете и капле. Поэтому сопротивление нагрузки, состоящей из вылета, капли и дуги, в этом же интервале увеличилось с 0,12 до 0,2 Ом, а ток уменьшился от 230 до 140 А. С 1028 кадра началось короткое замыкание при токе $I_{кп} = 310$ А и напряжении $U_k = 5$ В. Длительность короткого замыкания каплей $t_{кк}$ составила 4 мс, а длительность горения дуги $t_d = 152$ мс. Общая длительность микроцикла с переносом одной капли $T_{кк} = 156$ мс, что соответствует частоте переноса $f_k = f_{кк} = 6,4$ Гц.

В таком процессе каждый микроцикл образования и переноса одной капли завершается коротким замыканием капли на ванну. Объясняется это следующим образом. Короткое замыкание происходит потому, что типичная для такого процесса крупная капля перекрывает сравнительно малый межэлектродный промежуток, образовавшийся после переноса предыдущей капли. Малый размер такого промежутка, в свою очередь, объясняется низким напряжением холостого хода источника. Такой ха-

ракти переноса не является недостатком энергетической системы «источник–подающий механизм–дуга». Действительно, при короткой дуге перенос начинается с касания каплей ванны, и только после этого капля отделяется от электрода, что особенно полезно при сварке в положениях, отличных от нижнего. Такой процесс, как уже отмечалось, имеет устойчивый автоколебательный характер, и в то же время обладает определенными технологическими достоинствами — глубоким проплавлением и качественным формированием шва в любых пространственных положениях, достаточной производительностью при низкой стоимости материалов.

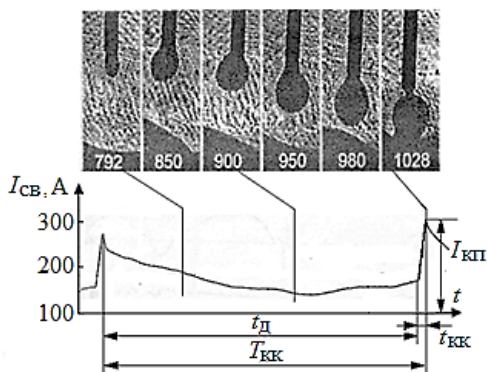


Рис. 8.10. Перенос с коротким замыканием
(проволока ER70S-6, $\varnothing 1$ мм, 6,6 м/мин, Ar+2 % O_2 , 168 А, 27 В)

Итак, пригодность оборудования для сварки короткой дугой определяется специфическим набором непосредственных и косвенных критериев сварочных свойств, отличным от приведенных выше для сварки без коротких замыканий

Непосредственные критерии оценки процесса переноса с технологическими короткими замыканиями, наблюдаемые на осциллограммах, отобраны так, чтобы адекватно отражать не только электрические, но расчетом и массо-размерные (m_k , d_k) характеристики переноса при сварке короткой дугой. Достоинство этих электрических критериев заключается еще и в большом объеме массивов данных, извлекаемых из таких осциллограмм, что позволяет выполнять их автоматическую статистическую обработку (разд. 11.4). К таким критериям относятся [8, 53, 222]:

- частота коротких замыканий каплями $f_{кк}$,
- длительность коротких замыканий каплями $t_{кк}$,
- длительность горения дуги между короткими замыканиями t_d ,
- энергия дуги на стадии образования одной капли A_d ,
- пиковый ток короткого замыкания каплями $I_{кп}$,
- скорость нарастания тока короткого замыкания каплями dI_k/dt ,

— интеграл действия тока короткого замыкания каплями $J_{\text{кк}}$.

В табл. 8.3 приведены результаты массового эксперимента по определению электрических характеристик переноса при сварке в углекислом газе с технологическими короткими замыканиями.

Таблица 8.3.

Непосредственные критерии переноса при механизированной сварке короткой дугой (выпрямитель ВС-420, подающий механизм Урал-3, CO_2 , Св-08Г2С)

Диаметр проволоки, мм	0,8				1,2				
Режим по ГОСТ 25616-83: №, ток, напряжение	1 70 А, 18 В		2 100 А, 19 В		8 150 А, 22 В		10 200 А, 24 В		
Настройки: напряжение источника U_x , В скорость подачи $V_{\text{под}}$, м/мин расход газа Q_T , л/мин	21,3		22,5		27		29		
	3,8		5,0		4,1		6,2		
	5		5		10		12		
Индуктивность дросселя $L_{\text{др}}$, мГн	0,1	0,2	0,1	0,2	0,2	0,38	0,35	0,51	
Коэффициент разбрызгивания ψ_p , %	4,08	3,70	3,58	2,97	3,11	3,45	1,96	1,83	
Частота коротких замыканий (КЗ) каплями	$f_{\text{кк.ср}}$, Гц	125	123	128	122	40,1	46,4	33,7	33,6
	$k_{\text{у/кк}}$	0,06	0,05	0,08	0,16	0,21	0,09	0,06	0,07
Длительность КЗ каплями	$t_{\text{кк.ср}}$, мс	1,7	1,6	1,8	1,6	3,8	4,0	5,2	6,9
	$k_{\text{у/кк}}$	0,24	0,19	0,38	0,25	0,29	0,25	0,21	0,32
Длительность горения дуги	$t_{\text{д.ср}}$, мс	4.3	5,6	4.9	5,5	19.7	20,6	22,8	22.8
	$k_{\text{у/д}}$	0,86	0,68	0,53	0,58	0,20	0,28	0,21	0,22
Пиковый ток КЗ каплями $I_{\text{кп.ср}}$, А	—	150	180	160	300	270	360	350	
Скорость нарастания тока КЗ каплями dI_k/dt , кА/с	—	77	90	65	50	40	52	35	

Частота коротких замыканий каплями $f_{\text{кк}}$ — непосредственный критерий переноса, близкий по физическому смыслу и числовому значению к частоте переноса f_k . Действительно, при сварке короткой дугой киносъемка показала, что большинство капель переносится в моменты коротких замыканий на ванну. Но при весовой оценке переноса следует

делать поправку на долю капель, переносимых без коротких замыканий, как правило, относительно мелких.

Еще одна поправка касается вероятного завышения $f_{\text{кк}}$ при его определении по осциллограммам. В работе [222] приведены спектры длительностей коротких замыканий (см. рис. 8.13), т.е. процентные вероятности $P_{\text{кк}}$ случаев коротких замыканий определенной длительности $t_{\text{кк}}$. Очевидно, что при малых $t_{\text{кк}}$ капля не успевает перетечь с электрода в ванну, и такие случаи следует исключать из общего счета $f_{\text{кк}}$ (если $t_{\text{кк}} < 0,5\text{--}2,5$ мс для электродов диаметром соответственно 0,8–2 мм).

Типичные значения частоты коротких замыканий каплями при сварке короткой дугой $f_{\text{кк.ср}}$ в табл. 8.3 — от 34 до 128 Гц (на других режимах и по данным других исследователей — от 5 до 200 Гц [53, 107, 117, 118]). Частота практически не меняется по ходу процесса (свойство стационарности процесса) и одинакова в разных экспериментах для конкретного режима (свойство эргодичности). С ростом диаметра электродной проволоки частота резко уменьшается, а с увеличением индуктивности несколько снижается. При увеличении скорости подачи (и тока) частота увеличивается сначала плавно, а при малом межэлектродном промежутке — все быстрее (рис. 8.11). При увеличении напряжения источника частота уменьшается. Дело в том, что при этом межэлектродный промежуток за счет эффекта саморегулирования удлиняется (см. уравнение 2.5). А это приводит к увеличению размера капель и, следовательно, к снижению частоты их образования.

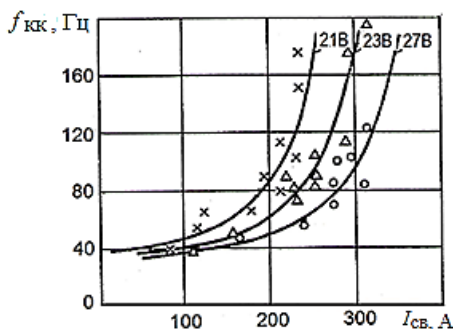


Рис. 8.11. Зависимость частоты переносов с короткими замыканиями от тока и напряжения (углекислый газ, проволока Св-08Г2С Ø1,2 мм, вылет 12 мм) [118]

Но максимальные значения частоты и высшая ее стабильность достигаются при рациональном соотношении тока и напряжения, предписанном, например, в ГОСТ 60974-1-2012. В нем по соображениям со-размерного формирования шва одновременно с увеличением тока уве-

личивают и напряжение. Так, при сварке в CO_2 (проволока $ER70S$, $\varnothing 1,2$ мм, 125–225 А) максимальная частота $f_{\text{КК}} = 90\text{--}100$ Гц получается при соотношении $U_{\text{св}} = 14 + 0,05 I_{\text{св}}$ [124]. При сварке короткой дугой в смеси $\text{Ar}+2\% \text{O}_2$ подтверждается похожая закономерность — максимальная частота 45–90 Гц получается при соотношении $U_{\text{св}} = 9 + 0,035 I_{\text{св}}$.

По экспериментальным результатам определения частоты можно получить представление о среднем размере капель:

$$d_{\text{к.ср}} \approx 3 \cdot \sqrt[3]{\frac{V_{\text{под}} d_{\text{э}}^2}{f_{\text{КК}}}}$$

Регулярность переноса следует оценивать именно по стабильности частоты коротких замыканий, которую характеризуют величиной коэффициента вариации частоты $k_{\text{вфк}}$. Действительно, этот коэффициент в табл. 8.3 имеет сравнительно небольшое и довольно близкое для разных режимов значение, что является важным достоинством любого критерия стабильности (значение $k_{\text{вфк}}$ от 0,05 до 0,16, если не считать одного выпадения до 0,21). Инвариантность и малость критерия $k_{\text{вфк}}$ дает основание многим исследователям для принятия его в качестве главной характеристики регулярности переноса [17, 119, 120]. Ниже приведены осциллограммы регулярного переноса (рис. 8.12, а) и другого, оцененного сварщиком как нерегулярный (рис. 8.12, б). Здесь нерегулярный перенос возникает при относительно высоком напряжении источника, допускающем более длительный рост капель и приводящем к чередованию больших и малых пиков тока короткого замыкания. Анализ осциллограмм также убеждает в адекватности такого критерия регулярности, поскольку для режима с регулярным переносом $k_{\text{вфк}} = 0,05$, а для нерегулярного $k_{\text{вфк}} = 0,13$. По согласованию с работой [85] нерегулярным предлагается считать перенос при $k_{\text{вфк}} > 0,15$.

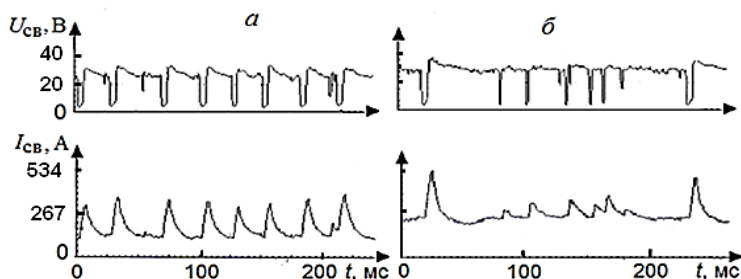


Рис. 8.12. Механизированная сварка в углекислом газе с технологическими короткими замыканиями: а — регулярный перенос (проволока Св-08Г2С $\varnothing 1,2$ мм, 200 А, 23 В, 0,2 мГц), б — нерегулярный перенос ($\varnothing 1,6$ мм, 300 А, 29 В, 0,66 мГц) (выпрямитель ВС-420, подающий механизм Урал-3)

Длительность коротких замыканий каплями $t_{\text{кк}}$ при сварке короткой дугой по данным табл. 8.3 имеет диапазон изменения средних значений от 1,6 до 6,9 мс, а по публикациям других исследователей [53] от 1,5 до 9 мс (для проволоки диаметром 0,8–2 мм). Она увеличивается с увеличением диаметра электрода и индуктивности дросселя.

Имеет смысл проанализировать также распределение плотности вероятности $t_{\text{кк}}$. По данным работы [222] распределение $P_{\text{кк}}$ даже на логарифмической шкале весьма неравномерно (рис. 8.13). Например, при сварке проволокой $\varnothing 1,2$ мм в газовой смеси при $t_{\text{кк.ср}} = 3,2$ мс разброс показаний составляет от 0,5 до 12 мс.

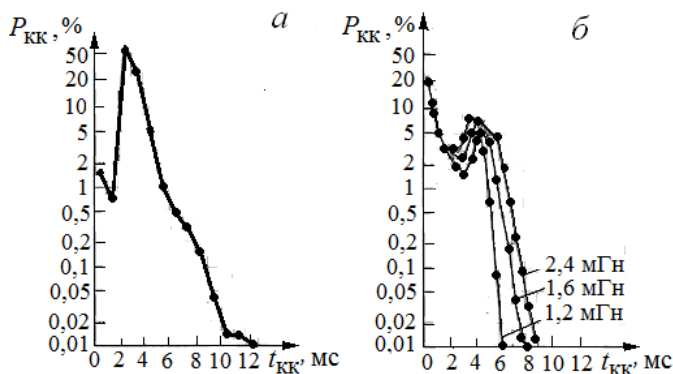


Рис. 8.13. Спектральные зависимости длительностей коротких замыканий для конвенциональных источников: а — выпрямитель GLC303 PA/3 (Cloos), 195–210 А, 17 В; б — выпрямитель CP-GL500 (Oerlikon), 210 А, 22 В (проволока $\varnothing 1,2$ мм, $\text{CO}_2 + \text{Ar}$, 15 л/мин)

Особенно важно из всего массива отсортировать малые длительности $t_{\text{кк}}$, при которых короткое замыкание не завершается переносом капли. Пороговым значением для проволоки диаметром 1,2 мм принято $t_{\text{кк}} = 1,5$ мс. На рис. 8.13, а видно, что для источника GLC303 таких случаев всего 2 %. И наоборот, у другого, также диодного выпрямителя GL500, но с большой индуктивностью (рис. 8.13, б), таких случаев набирается до 44%. Видно, что чрезмерная индуктивность дросселя в сварочной цепи замедляет развитие переходного процесса, и тем самым затрудняет перенос капли с первого касания. В работе [222] также показано, что и чрезмерно крутой наклон внешней характеристики источника приводит к такому же негативному результату.

Далее при оценке переноса учитываются только случаи с $t_{\text{кк}} \geq 0,5\text{--}2,5$ мс для электродов диаметром соответственно 0,8–2 мм.

Коэффициент вариации $k_{v\text{кк}}$ с учетом этого условия имеет сравнительно небольшую величину в диапазоне регулярного (по другим критериям) переноса — 0,19–0,38. Длительность коротких замыканий $t_{\text{кк}}$ можно поэтому рекомендовать в качестве дополнительной (к частоте $f_{\text{кк}}$) характеристики переноса. В вышеприведенном примере (см. рис. 8.12) для режима с регулярным переносом $t_{\text{кк.ср}} = 4,4$ мс при $\sigma_{\text{кк}} = \pm 1,2$ мс ($k_{v\text{кк}} = 0,27$). Это косвенно указывает на близкий размер капель, переносимых с короткими замыканиями. А для режима с нерегулярным переносом $t_{\text{кк}} = 4,6$ мс при $\sigma_{\text{кк}} = \pm 1,8$ мс ($k_{v\text{кк}} = 0,39$), что подтверждает предположение о неравномерности размера капель (смешанный вид переноса).

В работе [121] с помощью теории подобия методом анализа размерностей установлена зависимость

$$t_{\text{кк}} \sim L_{\text{др}} d_{\text{э}} V_{\text{под}} / U_{\text{и}}^2.$$

Кроме трех первых факторов ($L_{\text{др}}$, $d_{\text{э}}$ и $V_{\text{под}}$), уже отмеченных в табл. 8.3, обратим внимание на сильную обратную зависимость $t_{\text{кк}}$ от $U_{\text{и}}$. Это необходимо учитывать при выборе режимов, а также при оценке сварочных свойств по косвенным критериям.

Длительность интервалов горения дуги $t_{\text{д}}$ между короткими замыканиями по данным табл. 8.3 составляет от 4 до 23 мс. Она увеличивается при увеличении диаметра электрода, напряжения источника и индуктивности дросселя. Этот критерий находится с двумя ранее названными в физически мотивированном соотношении — $t_{\text{д}} + t_{\text{кк}} = 1/f_{\text{кк}}$. Поэтому $t_{\text{д}}$ может считаться дополнительным критерием переноса, менее важным в сравнении с $f_{\text{кк}}$ и $t_{\text{кк}}$. Достоинство этого критерия — в прямой пропорциональной связи с массой переносимой капли и в прямой связи с ее диаметром (в предположении переноса только каплями):

$$m_{\text{к}} = \frac{\gamma V_{\text{под}} t_{\text{д}} \pi d_{\text{э}}^2}{4} \quad \text{и} \quad d_{\text{к}} = \sqrt[3]{1,5 V_{\text{под}} t_{\text{д}} \pi d_{\text{э}}^2}$$

Энергия дуги на стадии образования капли $A_{\text{д}} = I_{\text{д}} U_{\text{д}} t_{\text{д}}$ — комплексный критерий, характеризующий готовность капли к переносу, предложен в работе [118]. Ее выбор вполне мотивирован с позиций общепризнанного механизма образования и отрыва капель (см. разд. 8.1). По минимуму ее коэффициента вариации ($k_{vA_{\text{д}}} = 0,30$) эффективно обнаруживается диапазон режимов с регулярным переносом (например, для проволоки диаметром 1,2 мм — 230 А, 21–23 В). Это согласуется с рекомендациями других исследователей при обосновании выбора режима. Главный недостаток этого критерия — сложность его оперативного вычисления, хотя при наличии МП-системы управления полуавтомата или источника это уже преодолимо. Также отметим, что электрическая энергия $A_{\text{д}}$, соответствующая образованию одной капли, не равна (значительно больше) теплосодержания капли в момент ее отрыва от электрода, поскольку не

учитывает распределения теплоты между электродом, столбом дуги и ванной.

Пиковый ток короткого замыкания $I_{кп}$ и скорость нарастания тока короткого замыкания каплями dI_k/dt — непосредственные электрические критерии переноса при сварке короткой дугой. При увеличении $I_{кп}$ и dI_k/dt возрастает роль электродинамической силы, в результате чего перенос ускоряется. Следовательно, они могут служить характеристиками энергичности переноса. Обе возрастают при увеличении напряжения холостого хода источника U_x и снижении его внутреннего сопротивления $R_{и}$ (или наклона внешней характеристики $|\rho_{и}|$). А скорость dI_k/dt увеличивается еще и при уменьшении индуктивности дросселя $L_{др}$ (4.27, 4.28). За счет этого устойчивость повышается, но одновременно усиливается разбрызгивание. Пиковый ток $I_{кп}$ превышает ток в интервалах горения дуги I_d в 2–3 раза, а средний сварочный ток $I_{св}$ ниже пикового в 1,6–2 раза.

Скорость нарастания тока короткого замыкания dI_k/dt , например, у стальных проволок диаметром 0,8–1,2 мм для надежного прерывания стадии короткого замыкания, а следовательно, для обеспечения технологической устойчивости сварки короткой дугой должна быть выше 40 кА/с. Однако и чрезмерно завышать dI_k/dt не рекомендуется, поскольку при скорости более 130–180 кА/с наблюдается повышенное разбрызгивание электродного металла (большие значения — для малых диаметров электрода). Более детализированные рекомендации по выбору оптимального значения dI_k/dt можно почерпнуть из табл. 8.4 [53]. Как видно, рекомендации дифференцированы в зависимости от диаметра проволоки, пространственного положения, а также от этапа процесса (скорость нарастания тока при установлении процесса должна быть высокой, но затем снижается).

Таблица 8.4.
Оптимальные значения скорости нарастания тока при сварке в CO_2

Диаметр электрода, мм	dI_{κ}/dt в начале сварки, кА/с	dI_{κ}/dt в установившемся процессе, кА/с				
		с короткими замыканиями				без коротких замыканий
		Пространственное положение				
		нижнее	вертикальное на спуск	вертикальное на подъем	потолочное	
0,8	120–150	70–90	80–100	100–120	110–130	110–150
1,0	120–140	60–80	80–90	90–110	110–120	80–150
1,2	110–130	50–70	60–90	80–90	90–110	80–150*
1,4	100–120	40–60	50–80	50–80	80–100	80–150*
1,6	70–85	20–40	45–50	45–50	–	70–85*
2,0	60–80	15–25		35–45	–	60–80*

*погруженная и полупогруженная дуга, порошковая проволока

*погруженная и полупогруженная дуга, порошковая проволока

Интеграл действия тока короткого замыкания каплей $J_{\text{кк}}$ — комплексный критерий переноса при сварке короткой дугой, учитывает совместное влияние плотности тока и его длительности на завершение и прерывание короткого замыкания каплей. Он определяется по формуле

$$J_{\text{кк}} = \int_0^{t_{\text{кк}}} \left(\frac{I_{\text{кк}}}{F_3} \right)^2 dt$$

где $I_{\text{кк}}/F_3$ — текущее значение плотности тока короткого замыкания, отнесенной к площади поперечного сечения электрода $[A/\text{мм}^2]$.

В работе [122] показано, что интеграл действия для конкретного электродного металла, например стали, может считаться постоянной величиной. При сварке в активном защитном газе ($\text{Ar} + 20\% \text{CO}_2$) для низкоуглеродистой сварочной проволоки YGW15 Ø1,2 мм постоянство $J_{\text{кк}} = 500 \text{ A}^2\text{с}/\text{мм}^4$ подтверждено при варьировании сварочного тока в интервале 100–300 А и напряжения в интервале 14–23 В.

Пример оценки переноса при сварке в углекислом газе короткой дугой приведен в табл. 8.3. Использовался диодный выпрямитель ВС-420 с витковой настройкой напряжения, с наклоном внешней характеристики – 0,02 В/А. Подающий механизм Урал-3 — с тиристорным приводом и коллекторным двигателем, плавно регулируемый, со стабилизацией скорости подачи не хуже 3 %. Выполнялся массовый эксперимент с варьированием диаметра проволоки d_p , напряжения холостого хода U_x , скорости подачи проволоки $V_{\text{под}}$ и индуктивности дросселя $L_{\text{др}}$. По отдельности критерии оценки переноса были охарактеризованы выше, поэтому здесь только сопоставим режимы по стабильности переноса.

Общая оценка стабильности переноса для всей совокупности режимов, приведенных в табл. 8.3, высокая. Действительно, для восьми испытанных режимов среднее значение коэффициента вариации частоты переноса $k_{\text{вfkк}} = 0,10$, а коэффициента вариации длительности коротких замыканий — $k_{\text{вkkк}} = 0,27$, что характеризует перенос как регулярный. Дело в том, что эти режимы приняты из ГОСТ 25616-83 (№1–10) как гарантирующие благоприятное течение процесса сварки короткой дугой. В них согласованием параметров $V_{\text{под}}$ и U_x обеспечивается оптимальное соотношение сварочного тока и напряжения $U_{\text{св}} = 14 + 0,05I_{\text{св}}$. Для сравнения приведем характеристики переноса, полученные на этом же оборудовании, но для переходного режима (№17, 300 А) (табл. 8.6). Они значительно хуже — средний коэффициент вариации частоты переноса $k_{\text{вfkк}} = 0,15$, а коэффициент вариации длительности — $k_{\text{вkkк}} = 0,37$.

Дополнительно в этом эксперименте по критериям стабильности переноса уточнялась необходимая величина индуктивности дросселя. Широкий диапазон варьирования индуктивности от 0,1 до 0,5 мГн принимался из табл. 8.7 по рекомендациям работ [8, 53]. Видно, что для снижения разбрызгивания электродного металла индуктивность можно существенно увеличивать. Однако, для принятых максимальных значений $L_{\text{др}}$ обнаружено чрезмерное уменьшение тока $I_{\text{кп}}$ и скорости $dI_{\text{к}}/dt$, и поэтому существенное замедление переноса по величине $t_{\text{кк}}$, а

также значительный разброс этой величины — $k_{\text{утк}} > 0,3$. Поэтому при сварочном токе до 200 А логично ограничивать индуктивность величиной 0,3 мГн.

8.2.3. Разбрызгивание электродного металла.

Коэффициент потерь на угар и разбрызгивание электродного металла k_p — самый распространенный непосредственный критерий переноса. Он характеризует побочный, и даже негативный результат сварочного процесса, поэтому стремятся к его уменьшению. В соответствии с ГОСТ 25616-83 коэффициент потерь определяют сравнением масс израсходованного и усвоенного швом электродного металла по формуле

$$k_p = \frac{M_p - M_n}{M_p} \cdot 100 \% \quad (8.1)$$

где M_n — масса наплавленного, а M_p — масса расплавленного электродного металла.

В этом эксперименте выполняют наплавку со скоростью около 25 м/час в течение не менее 30 с в нижнем положении на пластину. Режимы наплавки принимают из табл. В.4. Массу наплавленного металла M_n определяют как разность результатов взвешивания пластины до наплавки и после наплавки и удаления брызг с ее поверхности. Точность взвешивания — не хуже 100 мг. Масса расплавленного металла M_p определяется взвешиванием отрезка сварочной проволоки до и после наплавки с точностью не хуже 100 мг. В зачет идет среднеарифметическое значение k_p по результатам не менее трех наплавов.

Коэффициент разбрызгивания электродного металла ψ_p — другой непосредственный критерий результата переноса:

$$\psi_p = \frac{M_6}{M_p} \cdot 100\%, \quad (8.2)$$

где M_6 — масса брызг.

В этом случае выполняют наплавку на пластину, установленную внутри разборной медной коробки для улавливания брызг. Для определения массы M_6 по окончании наплавки собирают брызги с поверхности наплавленной пластины, в том числе приварившиеся, со стенок коробки-ловушки, а также с внутренней поверхности сопла горелки. Затем взвешивают брызги на аналитических весах с точностью не хуже 5 мг.

Естественно, коэффициент общих потерь k_p больше коэффициента разбрызгивания ψ_p , поскольку дополнительно учитывает потери на угар в виде паров и аэрозолей. В технической литературе накоплен большой объем экспериментальных данных с оценкой разбрызгивания, иногда без четкого различения двух этих коэффициентов друг от друга [8, 53,

107, 222]. При сопоставлении разных методов механизированной сварки по этим критериям установлено, что наиболее значительные потери наблюдаются у методов и режимов, осуществляемых с крупнокапельным переносом, особенно в переходных интервалах между четко выраженными видами переноса, приведенными на рис.8.2 (см. также рис. 8.3)

Подробнее проанализируем результаты оценки разбрызгивания при сварке сплошной стальной проволокой в углекислом газе с использованием конвенциональных источников [53]. Установлен экстремальный вид зависимости $k_p(I_{св})$ (рис. 8.14). С ростом тока при переносе с технологическими короткими замыканиями разбрызгивание сначала увеличивается. Причина, видимо, заключается в том, что при этом возрастает электродинамическая сила, возникающая в контакте капли с ванной в начале короткого замыкания, что зачастую приводит к выбрасыванию капли за пределы ванны. К тому же рост тока приводит и к увеличению электродинамической силы, разрушающей в конце короткого замыкания уже перемычку между электродом и каплей. Кроме того, следует учитывать, что при настройке режима с ростом тока обычно увеличивают и напряжение источника (для получения валика с оптимальным соотношением высоты и ширины). А рост напряжения вызывает увеличение длины дуги и интенсивное раскачивание капли, иногда приводящее к ее выбросу за пределы ванны.

При токах выше 200–250 А и соответствующих им напряжениях 25–30 В недостатки описанных явлений усугубляются чередованием переноса то мелких, то крупных капель. При этом крупная капля может достигать размера (3–4) d_s , так что разбрызгивание возрастает до 10–13 %. Но при дальнейшем увеличении тока более 300–350 А, а напряжения более 30 В разбрызгивание начинает снижаться. Дело в том, что при таких режимах существенно уменьшается размер капли, которая уже не может перекрыть межэлектродный промежуток и точнее ориентирована по оси электрода, и поэтому вероятней попадает в сварочную ванну.

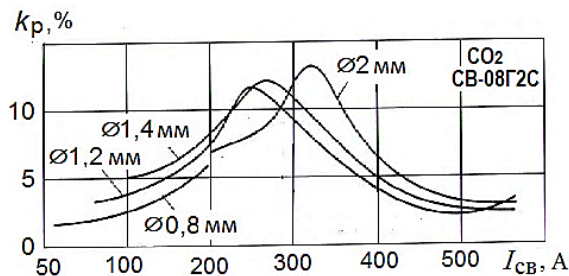


Рис. 8.14. Разбрызгивание электродного металла при механизированной сварке в углекислом газе [118]

Именно по причине нерегулярного переноса и связанного с этим снижения устойчивости и выделена зона «запретных» режимов при сварке в углекислом газе — в интервале 200–350 А. В более поздних работах границы зоны уточнены для конкретных диаметров электродов. Например, для проволоки диаметром 1,2 мм — это 220–300 А. Подобная проблема «запретной» зоны режимов распространяется и на автоматическую сварку в активных газах — для электрода диаметром 3 мм границы зоны 500–550 А.

В работе [123] выбор непосредственных электрических критериев переноса выполнен с учетом их влияния на разбрызгивание электродного металла. Для этого производилась наплавка в углекислом газе низкоуглеродистой сварочной проволокой диаметром 1,2 мм в широком диапазоне режимов (скорость подачи 3,4–7,3 м/мин, напряжение 19–28 В, вылет проволоки 15–25 мм). Использовался инверторный источник с жесткой характеристикой, но без специальных функций. В установившемся режиме по осциллограммам сварочных тока и напряжения фиксировалось 12 параметров электрических процессов (табл. 8.5).

Таблица 8.5.

Коэффициенты корреляции между разбрызгиванием и электрическими параметрами сварки короткой дугой (проволока ER70S, Ø1,2 мм, CO₂)

Параметры осциллограмм		Все режимы	Режимы с обрывами дуги	Режимы без обрывов дуги
Длительность периода капельного переноса $T_{\text{кк}}$		0,92	0,06	0,82
Длительность интервалов горения дуги $t_{\text{д}}$		0,72	0,04	0,82
Длительность коротких замыканий каплями $t_{\text{кк}}$		0,11	0,12	– 0,16
Пиковый ток короткого замыкания каплями $I_{\text{кп}}$		0,17	0,23	0,18
Текущее значение тока короткого замыкания каплями $i_{\text{к}}$		0,26	0,35	0,26
Среднее значение тока короткого замыкания каплями $I_{\text{к,ср}}$		0,16	– 0,01	– 0,27
Среднеквадратические отклонения	$\sigma_{T_{\text{кк}}}$	0,75	0,43	0,79
	$\sigma_{t_{\text{д}}}$	0,74	0,37	0,79
	$\sigma_{I_{\text{кк}}}$	0,17	0,65	0,29
	$\sigma_{I_{\text{кп}}}$	0,50	0,76	0,66
	$\sigma_{i_{\text{к}}}$	0,20	0,89	0,14
	$\sigma_{I_{\text{к,ср}}}$	0,14	0,88	–0,30

На каждом режиме определялся коэффициент разбрызгивания $\psi_{\text{р}}$ методом сбора и взвешивания брызг. Вычислялись коэффициенты кор-

реляции между ψ_p и каждым из 12 упомянутых параметров. Вычисления выполнялись в трех вариантах: для всех режимов вместе, для режимов с длительными обрывами дуги, для режимов без обрывов.

Как следует из данных табл. 8.5, при устойчивых режимах (3 столбец), а также при небольшой доле неустойчивых процессов на данном режиме (1 столбец) коэффициент разбрызгивания лучше всего коррелируется с длительностями $T_{\text{кк}}$ и $t_{\text{д}}$. А параметры $t_{\text{кк}}$ и $I_{\text{к.ср}}$, плохо коррелирующиеся с ψ_p , авторы исключили из дальнейшего пользования при анализе разбрызгивания. Таким образом, в качестве непосредственных критериев для выявления причин разбрызгивания нужно использовать следующие электрические параметры:

- длительность периода капельного переноса с короткими замыканиями $T_{\text{кк}}$ (или обратную величину — частоту технологических коротких замыканий $f_{\text{кк}}$),

- длительность интервалов горения дуги $t_{\text{д}}$,

а также статистические характеристики их разброса:

- среднее квадратическое отклонение $\sigma_{T_{\text{кк}}}$,

- среднее квадратическое отклонение $\sigma_{t_{\text{д}}}$.

Как видно, этот набор несколько отличается от перечня электрических непосредственных критериев, принятых ранее для оценки устойчивости процесса и регулярности переноса при сварке короткой дугой (см. разд. 4.5.2 и 8.2.2).

Коэффициенты расплавления и наплавки по соотношениям

$$\alpha_p = M_p / (I_{\text{св}} t_{\text{св}}) \quad \text{и} \quad \alpha_n = M_n / (I_{\text{св}} t_{\text{св}})$$

определяются некоторыми исследователями при испытании источников и полуавтоматов для механизированной сварки. Хотя эти показатели характеризуют энергетическую эффективность плавления и переноса электродного металла, они зависят преимущественно от вида электродного металла и технологических особенностей сварочного процесса. Поэтому они безусловно не могут рекомендоваться для испытания источников и полуавтоматов в качестве критериев оценки переноса. Заметим все же, что связь между вышеприведенными характеристиками и коэффициентом потерь существует. Действительно, из (8.1) следует, что

$$k_p = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)}{\alpha_p} \cdot 100 \%$$

Пример оценки разбрызгивания при испытании выпрямителя ВС-420 показан в табл. 8.3. Подтверждаются известные закономерности разбрызгивания. Подбором индуктивности дросселя в зависимости от диаметра электродной проволоки по соотношению $L_{\text{др}} [\text{мГн}] = (0,3-0,4)d_0 [\text{мм}]$ удастся ограничить разбрызгивание на уровне почти в 2 раза ниже допустимого по ГОСТ 25616-83.

Видно, что при оптимальных соотношениях параметров сварки короткой дугой, принятых в табл. 8.3, коэффициент разбрызгивания составляет всего 2–4 %.

8.2.4. Непосредственные критерии переноса при других разновидностях сварочного процесса

Перенос переходного вида наблюдается в интервалах режимов, расположенных между интервалами со стабильным видом переноса (с короткими замыканиями, крупнокапельным, струйным) (см. рис. 8.3).

Смешанный мелко- крупнокапельный перенос, полученный при использовании источника с жесткой внешней характеристикой ($\rho_{\text{и}} = -0,015 \text{ В/А}$, $dI_{\text{к}}/dt = 34\text{--}40 \text{ кА/с}$), показан на рис. 8.15 [117]. Стабильность тока в таком процессе невысокая — $k_{\text{vI}} = 0,15$, особенно низка регулярность переноса.

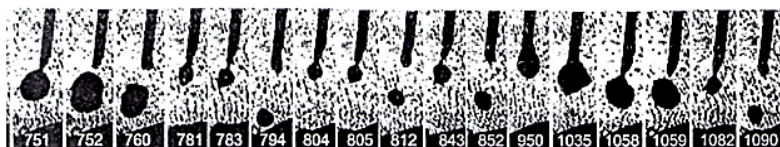


Рис. 8.15. Мелко- крупнокапельный перенос (инверторный источник с жесткой ВАХ, низкоуглеродистая стальная проволока $\varnothing 1 \text{ мм}$, 6,3 м/мин, 166 А, 28 В, Ar + 5 % O_2) [117]

При сварке в углекислом газе смешанный вид (крупнокапельный с редкими короткими замыканиями) обнаружен на режиме № 17 по ГОСТ 25616-83 по результатам осциллографирования (рис. 8.12, б). Параметры этого режима сведены в табл. 8.6. Отметим малую частоту ($f_{\text{кк}} = 14,6\text{--}15,8 \text{ Гц}$) и нерегулярность коротких замыканий ($k_{\text{уфкк}} = 0,13\text{--}0,17$ и $k_{\text{вкк}} = 0,27\text{--}0,46$). Общая же частота капельного переноса $f_{\text{к}}$ с учетом крупных капель, переносимых без коротких замыканий, но выявленных по небольшим всплескам на кривой тока, приблизительно в 1,5 раза больше. Обращает на себя внимание очень большое разбрызгивание (9,6 – 10,7 %), что впрочем не является неожиданным, поскольку по ГОСТ 25616-83 для этого режима допустимая величина $\psi_{\text{р}} = 10 \text{ %}$.

Перенос при сварке в пространственных положениях, отличных от нижнего, как известно, затруднен из-за неблагоприятного направления действия на каплю силы тяжести. В этом отношении определенными достоинствами обладает процесс с технологическими короткими замыканиями, потому что здесь отделение капли от электрода происходит уже после касания ею ванны и частичного перетекания в нее. В табл. 8.6 приведены результаты оценки переноса при сварке в углекислом газе вертикального шва методом «снизу вверх» на режиме № 9 по ГОСТ 25616-83. При сравнении с близким режимом №10, выполненным

в нижнем положении (см. табл. 8.3), видим, что частота коротких замыканий при сварке на вертикали выше ($f_{\text{кк}} = 76$ Гц). Но только часть таких замыканий завершается переносом капли, а часть прерывается до повторного касания. Поэтому и разбрызгивание при нормальной для нижнего положения индуктивности дросселя в случае сварки на вертикали довольно велико ($\psi_p = 7,4$ %). Но уже при увеличении индуктивности до 0,38 мГн частота коротких замыканий снижается почти до частоты реальных переносов капель ($f_k \approx f_{\text{кк}} = 55$ Гц), поэтому существенно снижается и разбрызгивание — до 4 %. Заметим, однако, что дальнейшее увеличение индуктивности нежелательно, поскольку приводит к снижению устойчивости.

Таблица 8.6.

Непосредственные критерии переноса при механизированной сварке в углекислом газе (выпрямитель ВС-420, подающий механизм Урал-3)

Диаметр проволоки, мм, марка		1,6 Св-08Г2С			1,2 Св-08Г2С		2,4 порошковая ПП-АН8	
Режим по ГОСТ 25616-83: №, ток, напряжение		17 300 А, 29 В			9 (вертикальное положение), 140 А, 22 В		— 350 А, 24 В	
Настройки: напряже- ние источника U_x , В; скорость подачи $V_{\text{под}}$, м/мин; расход газа $Q_{\text{г}}$, л/мин		37,5 5,8 18			27,0 3,5 12		33,2 6,0 12	
Индуктивность дросселя $L_{\text{др}}$, мГн		0,2	0,4	0,66	0,2	0,38	0,38	0,66
Коэффициент раз- брызгивания ψ_p , %		10,7	9,6	8,6	7,4	4,0		
Частота коротких замыканий (КЗ) каплями	$f_{\text{кк.ср}}$, Гц	15,6	14,6	15,8	76	55	11	14
	$k_{\text{вкк}}$	0,17	0,14	0,13	0,18	0,17		
Длительность КЗ каплями	$t_{\text{кк.ср}}$, мс	3,7	4,1	4,6	2,5	2,6	10,2	10,5
	$k_{\text{вкк}}$	0,46	0,27	0,39	0,52	0,22		
Длительность горения дуги	$t_{\text{д.ср}}$, мс	37,7	43,9	43,0	7,6	9,6		
	$k_{\text{вд}}$	0,46	0,53	0,58	0,20	0,19		
Пиковый ток КЗ каплями $I_{\text{кп.ср}}$, А		520	500	450	270	270	720	680
Скорость нарастания тока КЗ $dI_{\text{к}}/dt$, кА/с		54	54	48	48	46	225	189

Перенос при сварке порошковой проволокой может иметь разный характер в зависимости от состава ее сердечника. При сварке порошковой проволокой капли покрыты пленкой шлака, снижающей поверхностное натяжение и уменьшающей размеры капель. Градиент потенциала столба дуги ниже, чем при сварке сплошной проволокой в углекислом газе, что приводит к повышению устойчивости и удлинению дуги. При сварке проволокой ПП-АН8 с рутил-органическим сердечником и дополнительной защитой углекислым газом иногда наблюдается перенос с редкими технологическими короткими замыканиями (табл. 8.6). В таком случае результаты осциллографирования можно использовать для характеристики энергичности переноса по величине $I_{кп}$ и dI_k/dt , но в меньшей степени для оценки его регулярности.

В работе [42] предпринята попытка более качественной оценки переноса на основе разделения сигналов коротких замыканий на действительные и случайные. Поскольку сверхмалые длительности коротких замыканий (менее 0,5–1 мс) не достаточны для переноса капель в ванну, то из всего массива значений $t_{кк}$ выделены только более продолжительные, при которых короткие замыкания названы действительными, т.е. завершающимися переносом крупной капли. Установлено, что частота действительных коротких замыканий резко снижается с ростом напряжения дуги. А при напряжении выше 22 В таких замыканий почти нет.

Перенос при автоматической сварке под флюсом исследован в работе [206]. С этой целью использовалась скоростная видеосъемка (10000 кадров/с) в жестяном туннеле, установленном поперек хода сварочного автомата. Дуга при подходе к туннелю прожигает его стенку, и в этот момент начинается видеосъемка в газовой каверне, окружающей дугу. В поле зрения видеокамеры попадает торец электрода, переносимый электродный металл, сварочная ванна и стенка из расплавленного шлака, удерживающая каверну (рис. 8.16). На низких режимах ($\varnothing 3,2$ мм, 500 А, 30 В, 27 м/час) перенос металла в ванну выполняется свободно летящими каплями, поскольку длина дуги при такой сварке под флюсом составляет 7–15 мм. Капля имеет размер от 3,3 до 3,6 мм при частоте переноса 8–12 Гц. В отличие от механизированной сварки в защитном газе форма капли далека от сферической. С ее поверхности, так же как и с торца электрода взрывообразно выбрасываются более мелкие частицы, которые затем движутся хаотически, но также попадают в ванну.

На высоких режимах ($\varnothing 3,2$ мм, 1000 А, 38 В, 43 м/час) значительно меньшая часть электродного металла переносится каплями. Частота переноса увеличивается до 65–100 Гц, а диаметр капель

составляет не более 2-2,5 мм. Но значительная часть электродного металла выбрасывается с торца мелкими частицами и струйками и, хаотически завихряясь, также летит в ванну.

При осциллографировании тока и напряжения обнаруживаются высокочастотные колебания (до 60 кГц), очевидно вызванные хаотическими движениями анодного и катодного пятен по торцу электрода и ванне. Например, при среднем сварочном напряжении 30 В диапазон его колебаний составил от 20 до 45 В. Капельный перенос с помощью осциллограмм выявить не удастся.

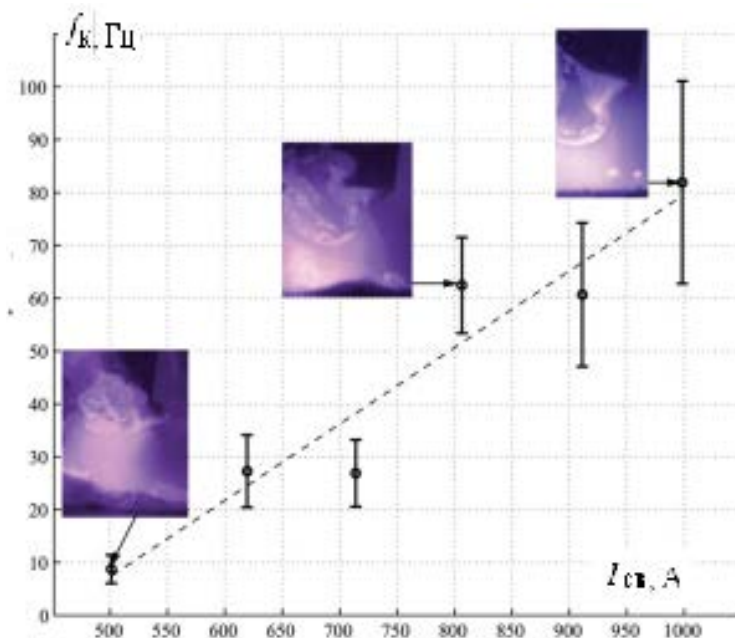


Рис.8.16. Автоматическая сварка под флюсом: (инверторный источник Power Wave AC/DC 1000, стальная проволока L-30 Ø 3,2 мм, обратная полярность)

Проанализируем зависимости характеристик переноса от параметров режима и источника [120]. При сварке на постоянном токе дугой обратной полярности (*DCEP*) при увеличении тока от 500 до 1000 А средняя частота капельного переноса f_k возрастает от 9 до 82 Гц (рис. 8.16). При сварке на переменном токе (AC), точнее, дугой с разнополярными импульсами, частотой 60-70 Гц (см. разд. 10.4.5)

капельный перенос более энергичный – на тех же токах $f_k = 28-76$ Гц. Интересно отметить, что большая часть переносов (72%) приходится на такты обратной полярности (EP).

8.3. Косвенные критерии переноса при механизированной и автоматической сварке

8.3.1. Математические модели процесса переноса

Математическое описание переноса электродного металла в зависимости от параметров режима сварки представлено в технической литературе в следующих формах [211].

1) Статический баланс сил, действующих на каплю на торце электрода (*SFBT — static force balance theory*) [8]. По этой методике определяются диаметр и частота переноса сферической капли в момент уравнивания сил, удерживающих и отделяющих каплю от электрода. Наилучшая адекватность модели реальному процессу наблюдается при крупнокапельном переносе.

2) Динамический баланс сил, действующих на каплю (*DFBT*) отличается учетом сил инерции, возникающих при движении капли [103].

3) Теория неустойчивой токопроводящей струи жидкого металла, подверженной сжимающему действию пинч-эффекта (*PIT — pinch instability theory*) [210]. При этом капельный перенос рассматривается как результат распада жидкой цилиндрической струи. Теория качественно отражает струйный перенос.

4) Уравнения гидростатики в виде частных производных давления жидкого металла в осевом и радиальном направлениях с добавлением электромагнитных сил для учета действия сварочного тока.

5) Полная система уравнений Навье – Стокса [211] включает в себя – уравнения гидродинамики в виде частных производных осевой и радиальной скоростей движения жидкого металла капли с учетом динамической вязкости,

– уравнения электродинамики для учета электрических и магнитных процессов в капле и плазме дуги,

– уравнения теплопередачи.

Две последние модели решаются только численными методами и дают наиболее точные результаты по определению частоты, объема, формы и скорости движения капли (в основном при переносе свободно летящей капли). Обе модели требуют использования специальных вычислительных программ и поэтому не относятся к инженерным расчетам. Впрочем и остальные приведенные здесь модели трудны в анали-

тическом решении, хотя и дают удобные качественные решения относительно влияния режимов сварки на параметры переноса. Первые модели (1–3) можно использовать в исследовательских испытаниях при разработке сварочных материалов и технологий.

Но в связи с иной целевой установкой работы покажем только качественные (не количественные) зависимости непосредственных критериев переноса от параметров режима и характеристик сварочного оборудования. В основном они получены экспериментально, но при этом хорошо согласуются с решениями вышеописанных моделей. Функциональная связь характеристик переноса в системе саморегулирования может быть представлена в следующем виде:

$$\left. \begin{array}{l} U_x \rightarrow U_{\text{св}} \rightarrow I_d \rightarrow \\ L \rightarrow \\ V_{\text{под}} \rightarrow I_{\text{св}} \rightarrow \end{array} \right\} d_k \rightarrow f_k$$

Задающие воздействия в системе саморегулирования — это напряжение холостого хода источника U_x и скорость подачи проволоки $V_{\text{под}}$. В динамическом процессе образования и переноса капель кроме них также учитывают индуктивность дросселя или в целом сварочной цепи L . Именно эти величины и следует принять в качестве косвенных критериев для прогнозирования характера переноса. Энергетические параметры режима — напряжение $U_{\text{св}}$ и ток $I_{\text{св}}$, а также длина дуги l_d — устанавливаются самопроизвольно в зависимости от вышеназванных задающих воздействий, а также от устанавливаемых сварщиком диаметра d_s и вылета l_v электродной проволоки. Значения непосредственных критериев капельного переноса — диаметр d_k и частота f_k — зависят также от вида защитной среды и материала электрода, в частности от его теплофизических свойств.

8.3.2. Электрические параметры оборудования, влияющие на перенос

Далее приведены только наиболее обоснованные значения косвенных критериев, способствующие приемлемому качеству переноса.

Напряжение холостого хода источника U_x при механизированной и автоматической сварке — косвенный критерий, характеризующий пригодность источника для получения конкретного вида переноса. Так, при сварке в углекислом газе на токах до 200–250 А перенос за счет технологических коротких замыканий обеспечивается именно благодаря короткой дуге с напряжением $U_{\text{св}} = 15\text{--}25$ В. В конвенциональном источнике с жесткой (прямолинейно падающей) характеристикой с наклоном $p_H = -0,02 \dots -0,04$ В/А такое сварочное напряжение обеспечивается настройкой напряжения холостого хода $U_x = 16\text{--}33$ В. В со-

временном источнике с комбинированной внешней характеристикой это же требование относится к основному (жесткому) участку 2 внешней характеристики (см. рис. 4.28).

Но в диапазоне высоких токов (более 300–350 А) для снижения разбрызгивания предпочтительна сварка длинной дугой с напряжением $U_{св} = 30\text{--}44$ В. При этом источник с жесткой характеристикой при таком же наклоне $-0,02 \dots -0,04$ В/А должен иметь напряжение $U_x = 36\text{--}60$ В.

При сварке плавящимся электродом в аргоне и его смесях с углекислым газом и кислородом без коротких замыканий дуга горит спокойно при относительно низком напряжении $U_{св}$ от 8 до 30 В. А напряжение U_x требованиями переноса здесь не регламентируется. Это же относится и к автоматической сварке под флюсом.

Скорость подачи электродной проволоки $V_{под}$ при сварке в аргоне и его смесях — косвенный критерий пригодности подающего механизма для обеспечения струйного переноса. Критический ток $I_{кр}$ перехода к струйному процессу для алюминиевых и стальных проволок диаметром 0,8–2 мм составляет от 100 до 400 А. При этом в технической характеристике подающего механизма необходимо предусмотреть скорость подачи, соответствующую такому току. Например, при сварке алюминиевой проволокой Св-АМг6 диаметром 1,6 мм $I_{кр} = 180$ А, что обеспечивается скоростью подачи $V_{под} = 5,5$ м/мин. Поскольку стандартом ГОСТ 18130-79 на сварочные полуавтоматы предусмотрен диапазон настройки скорости подачи от 1 до 16 м/мин, требование обеспечения струйного переноса можно считать легко выполнимым.

Индуктивность дросселя или сварочной цепи L — косвенный критерий пригодности сварочного оборудования по уровню разбрызгивания электродного металла. Наиболее остро стоит эта проблема при сварке в углекислом газе. Экспериментально обоснован выбор индуктивности дросселя в зависимости от диаметра электрода в работе [8] (табл. 8.7). Здесь же приведены индуктивности дросселя, теоретически вычисленные для обеспечения скоростей нарастания тока короткого замыкания dI_k/dt , рекомендуемых в табл. 8.4 [53]. Расчеты индуктивности выполнены по формуле (4.27) для режимов, предусмотренных стандартом ГОСТ 25616-83 для испытания сварочных источников. Как видно, нижний (расчетный) ряд индуктивностей шире, чем верхний. Отсюда следует, что значения, приведенные в верхнем ряду, не критичны. Поэтому в реальных конструкциях источников ограничиваются дросселем всего на 1–2 ступени индуктивности. Источник на 200 А может иметь нерегулируемый дроссель с $L_{др} = 0,3$ мГн, а на 500 А — двухступенчатый с $L_{др} = 0,3$ и $0,7$ мГн.

Таблица 8.7.

Оптимальные значения индуктивности дросселя
для механизированной сварки в углекислом газе (Св–08Г2С)

Диаметр электрода, мм	0,8	1,0	1,2	1,6	2,0
Опытные данные с учетом разбрызгивания [8], мГн	0,3	0,3–0,4	0,4–0,5	0,6–0,8	1,0–1,4
Расчет по оптимальной скорости нарастания тока КЗ каплями [53], мГн	0,15–0,35	0,22–0,50	0,25–0,68	0,34–1,26	–

Известны следующие разновидности дросселей.

1) Линейный (с ненасыщающимся сердечником) на 1–2 ступени настройки индуктивности (рис. 8.17, а). Для его расчета можно пользоваться простым соотношением [125]

$$L_{\text{др}} = \frac{\mu_0 S_M W_p^2}{l_M / \mu + \delta},$$

где μ — относительная магнитная проницаемость железа,

l_M и S_M — длина и площадь сечения магнитопровода.

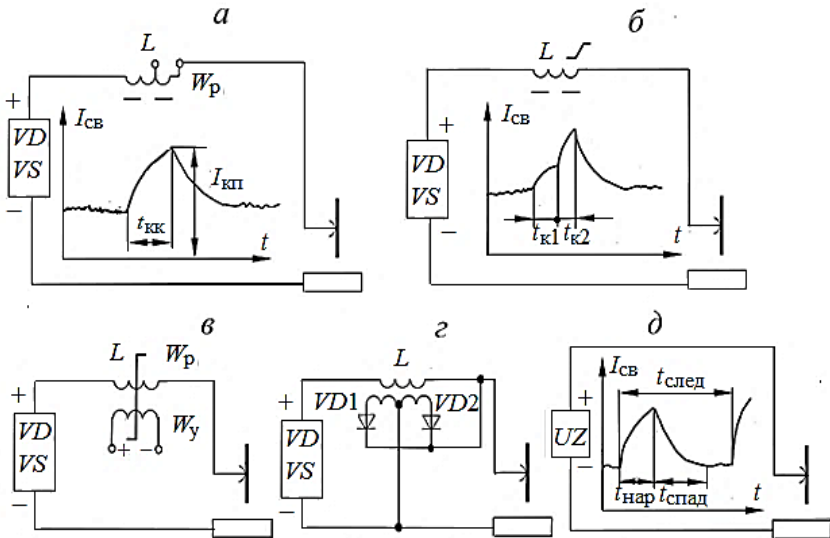


Рис. 8.17. Дроссель в цепи постоянного сварочного тока

Ступенчатая настройка выполняется изменением числа витков W_p силовой обмотки или изменением величины зазора δ в магнитопроводе установкой немагнитных прокладок с абсолютной проницаемостью μ_0 .

2) Нелинейный дроссель (рис. 8.17, б). До прикосновения капли к ванне он имеет сравнительно большую индуктивность, и поэтому в интервале $t_{к1}$ существенно ограничивает ток короткого замыкания, способствуя слиянию капли с ванной. Но затем его железо под действием тока короткого замыкания, проходящего и по его обмотке, быстро насыщается. В результате в течение $t_{к2}$ индуктивность дросселя снижается, а ток резко увеличивается, ускоряя перенос капли.

3) Дроссель насыщения (рис. 8.17, в) с плавной электрической настройкой позволяет изменять индуктивность с помощью обмотки управления W_y в зависимости от диаметра электрода и положения шва в пространстве. У такого дросселя можно изменять индуктивность по ходу сварки, например, ограничивая в начальном периоде установления процесса и восстанавливая ее в установившемся процессе.

4) Автоматический дроссель (рис. 8.17, г) используется, например, в составе универсального тиристорного выпрямителя ВДУ-506 [24, 126]. При ручной сварке дроссель имеет максимальную индуктивность — 0,5 мГн. При механизированной сварке в углекислом газе его индуктивность изменяется автоматически в зависимости от режима сварки следующим образом. При низких режимах наблюдается значительная пульсация выпрямленного тока, протекающего по рабочей обмотке W_p дросселя. Поэтому в обмотке управления W_y индуктируются большие ЭДС и ток, замыкающийся по вентилям $VD1$, $VD2$ и дуге. Этот ток создает с помощью обмотки управления большой магнитный поток, насыщающий железо дросселя. Поэтому при низких режимах дроссель имеет малую индуктивность, при высоких — большую индуктивность, как и следует из требований технологического процесса.

5) «Электронный дроссель» (рис. 8.17, д) в действительности дросселем не является. Так названа специальная функция современного источника с высоким быстродействием (инвертора или чоппера), позволяющая настраивать скорость нарастания и спада тока при переносе капли с коротким замыканием. Источник UZ быстро увеличивает ток в течение настроенного интервала нарастания тока $t_{нар}$, обеспечивая энергичный перенос капли с коротким замыканием. Затем источник более медленно снижает ток до настроенного тока дуги в течение интервала спада $t_{спад}$, обеспечивая при этом расплавление следующей капли. «Электронный дроссель» включается по сигналу обратной связи о готовности капли к переносу, либо запускается через постоянный интервал следования импульсов $t_{след}$.

8.4. Управление переносом с помощью импульсного источника

8.4.1. Сварка без технологических коротких замыканий

Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом в защитном газе выполняется с подачей мощных пиковых импульсов тока. Обычно здесь реализуется принцип жесткого программного управления переносом, при котором запуск импульсов не согласуют с состоянием капли, а частота и другие характеристики импульсов в процессе сварки остаются неизменными. Параметры импульсов подбираются сварщиком, а в случае синергетического управления вычисляются по математической модели или выбираются по исходным технологическим условиям (свариваемый материал и его толщина, материал и диаметр проволоки, тип защитной среды и т.д.). Жесткое управление дает технологический эффект в виде регулярного мелкокапельного переноса только для пространственно устойчивых дуг. Этому условию отвечает сварка в аргоне и смесях на его основе дугой как обратной, так и прямой полярности. Импульсно-дуговая сварка в углекислом газе с несколько меньшим эффектом возможна на прямой полярности дуги при использовании стальной проволоки, активированной галогенидами щелочно-земельных и щелочных металлов.

Современные типы импульсных источников показаны на рис. 8.18.

1) Наиболее просты тиристорные импульсные приставки, подключаемые к дуге параллельно основному источнику G (рис. 8.18, *а*). В одном из полупериодов импульсный ток идет по цепи T – $VS1$ –дуга– $VD1$ – T . Тиристор $VS1$ отпирается на спаде полуволны переменного тока, поэтому импульс имеет форму пикообразного отрезка синусоиды. При уменьшении угла управления тиристора увеличиваются амплитуда и длительность импульса. В случае работы только одного тиристора частота импульсов 50 Гц, при попеременном включении двух тиристоров — 100 Гц. В случае использования трехфазного трансформатора можно получить импульсы с частотой 150 Гц и долинные от последней — 75, 50 и т.д.

2) Инверторные импульсные источники получили наибольшее распространение (рис. 8.18, *б*). Постоянное напряжение диодного блока $VD1$ при попеременном включении транзисторов $VT1$ и $VT2$ преобразуется в высокочастотное переменное напряжение, которое затем понижается трансформатором T , выпрямляется диодным блоком $VD2$ и подается на дугу. Сбрасывание капли может выполняться кратковременным увеличением амплитуды, частоты или ширины импульсов высокочастотного тока. Поскольку в этом случае на высокую регулярную частоту 20–100 кГц накладывается низкая частота сбрасывающих импульсов 20–200 Гц, такой прием называют двойным модулированием тока.

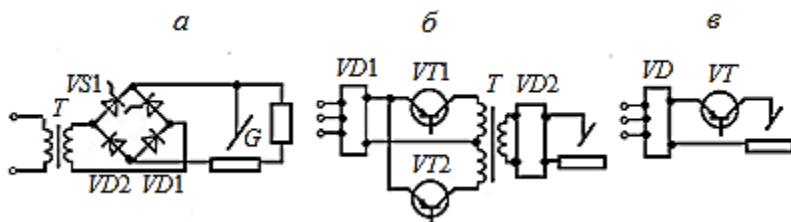


Рис. 8.18. Типы импульсных источников

3) Последним достижением в разработке импульсных источников является конструкция с транзисторным регулятором (рис. 8.18, в). Транзистор VT управляет работой выпрямителя VD, обеспечивая необходимый ток и в импульсе, и в паузе. Закон изменения сварочного тока определяется характером тока базы транзистора (не путать с базовым током источника). Ток базы, в свою очередь, сформирован слаботочной системой управления с широкими возможностями раздельной настройки импульсного и базового тока, а также частоты и длительности импульсов.

Требования к источникам для импульсно-дуговой сварки в аргоне и его смесях сформулированы в работах [24, 127–129].

1) Ток импульса $I_{\text{и}}$ для надежного сбрасывания капли должен превышать критический ток $I_{\text{кр}}$, соответствующий мелкокапельному или струйному переносу (рис. 8.19, а). При сварке проволокой от 0,8 до 2,5 мм $I_{\text{и}}$ настраивается на уровне 200–800 А соответственно. Длительность импульса $t_{\text{и}}$ должна регулироваться от 1 до 10 мс. Для того, чтобы обеспечить принцип «один импульс на одну каплю», необходимо гарантировать выделение в импульсе достаточной энергии или обеспечивать пропорциональную ей величину $I_{\text{и}}^2 t_{\text{и}}$. Например, при сварке алюминиевых сплавов эта величина должна быть 180–280 А²с, а при сварке сталей — 500–1000 А²с.

2) Частота импульсов $f_{\text{и}}$ должна настраиваться от 20 до 200 Гц. Иногда ограничиваются легко достижимыми величинами 50 и 100 Гц, кратными частоте сетевого напряжения. Соотношение между периодом следования импульсов $T = 1/f_{\text{и}}$ и их длительностью $t_{\text{и}}$, называемое скважностью, может достигать значения $T/t_{\text{и}} = 10$ и более.

3) Базовый ток $I_{\text{б}}$ существенно ниже тока импульса. Среднее значение тока $I_{\text{св.ср}} = [(I_{\text{и}} t_{\text{и}} + I_{\text{б}}(T - t_{\text{и}}))/T]$ назначается в зависимости от толщины свариваемого металла и положения шва в пространстве. Средний ток настраивается изменением скорости подачи электродной проволоки. В этих условиях независимая настройка базового тока затруднена. Стремятся только, чтобы он не упал ниже минимально возможного сварочного тока $I_{\text{свmin}}$, при котором существенно снижается устойчивость

(см. табл. 4.3). Для инверторного источника, обеспечивающего прямоугольную форму импульса, это условие с учетом рекомендаций работы [208] можно сформулировать так: $I_6 = (TV_{\text{под}}/k_{\text{ст}} - I_{\text{и}}t_{\text{и}})/(T - t_{\text{и}}) \geq I_{\text{свmin}}$.

4) Форма импульса у современных источников на основе инвертора или транзисторного регулятора с МП-управлением может быть пиковой, плавно нарастающей или плавно спадающей, что придает источнику дополнительные возможности управления переносом. В зависимости от материала электродной проволоки, ее диаметра, положения шва в пространстве и других технологических условий могут меняться параметры роста, пика и спада импульса [130] (рис. 8.19, б). Для сохранения пикового характера тока $I_{\text{и}}$ следует ограничивать индуктивность цепи импульсного тока значением $L < (R_{\text{и}} + R_{\text{вн}})/2\pi f$ [214].

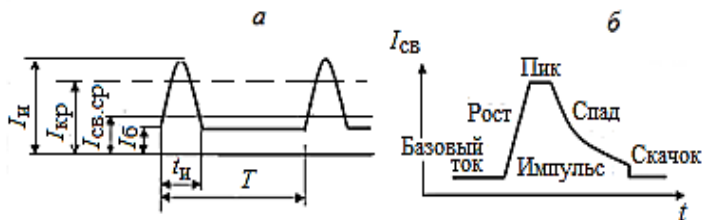


Рис. 8.19. Типовая осциллограмма (а) и настройка формы импульсов тока (б) при импульсно-дуговой сварке

Экспериментальная оценка сварочных свойств оборудования для импульсно-дуговой сварки должна включать проверку соблюдения заявленного алгоритма программного управления переносом, а также проверку стабильности величин I_6 , $I_{\text{и}}$, $t_{\text{и}}$, $f_{\text{и}}$. Кроме того, необходимо убедиться в пользе от перехода к такому сложному технологическому процессу, каким является импульсно-дуговая сварка (обеспечение устойчивости при сверхнизком токе, уменьшение разбрызгивания, качество сварки вертикальных и потолочных швов и т.д.).

Пример оценки сварочных свойств импульсного источника с транзисторным регулятором MIG-PULSE 402 (Union Carbide, США) с установкой VUZ-L3, управляемых с помощью ЭВМ SM 4-20, приведен в работе [131] (табл. 8.8).

В предварительном эксперименте на режиме, принятом по литературным рекомендациям, обнаружены нарушения настроенного цикла. В 2 % микроциклов происходит обрыв дуги на стадии базового тока и в 3 % — короткие замыкания каплями на стадии импульса. Коррекция режима заключалась в основном в изменении параметров на стадии базового тока для повышения устойчивости. Длительность t_6 была сокращена с 15 до 8 мс, но и ток I_6 снижен со 100 до 50 А. Кроме того, в окончательном варианте энергия импульса была повышена увеличением как $U_{\text{и}}$, так и $t_{\text{и}}$.

Таблица 8.8.

Технологический эксперимент по импульсно-дуговой сварке
(MIG-PULSE 402 + VUZ-L3, Ar + 10 % CO₂,
проволока C123 Ø1,2 мм, $V_{\text{под}} = 5$ м/мин)

Вариант	Напряжение источника, В	Параметры импульсов								
		$t_{и},$ мс	$t_{б},$ мс	$f_{и},$ Гц	$I_{св.ср}$ А	$I_{и},$ А	$I_{б},$ А	$U_{св.ср},$ В	$U_{и},$ В	$U_{б},$ В
предварительный	34	2	15	59			100			
окончательный	36	2,2	8	98	160	440	50	24,1	33	20

Осциллограммы скорректированного варианта (рис. 8.20) иллюстрируют управляемый перенос капель. Импульсный процесс имеет регулярную частоту, точно соответствующую настроенному значению $f_{\text{и}} = 98$ Гц. Амплитудное значение тока импульса $I_{\text{и}} = 440$ А, что с запасом превышает критический ток, для проволоки диаметром 1,2 мм составляющий $I_{\text{кр}} = 330$ А. Все это и гарантирует стабильный малый размер и регулярное сбрасывание одной капли каждым импульсом. В результате получен устойчивый процесс без обрывов и коротких замыканий каплями.

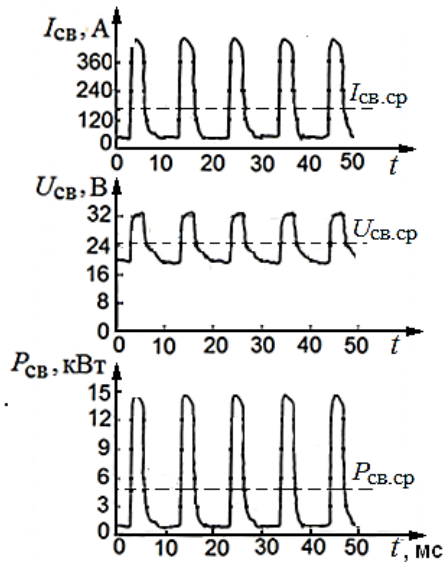


Рис. 8.20. Осциллограммы тока, напряжения и мощности при импульсно-дуговой сварке (условия в табл. 8.8)

Другие алгоритмы импульсно-дуговой сварки.

1) Система *Super Pulse (ESAB)* объединяет два вида управления — переносом и формированием шва [132] (см. также разд. 7.4 и рис.7.20). Для управления капельным переносом предлагается широкий диапазон (явно избыточный) настройки импульсного режима с $f_{\text{и}} = 16\text{--}312$ Гц и $t_{\text{и}} = 1,7\text{--}25,5$ мс. Для управления формированием шва в зависимости от толщины свариваемых изделий разработаны три алгоритма чередования более длительных импульсных интервалов. Каждый из этих алгоритмов содержит две фазы продолжительностью от 0,01 до 2,5 с. При сварке тонкого металла (толщиной до 2 мм) в первой фазе установление процесса поддерживается импульсами, а вторая выполняется непрерывным током с естественным характером переноса за счет технологических коротких замыканий, после чего опять следуют импульсы первой фазы (рис. 8.21, а). При сварке металла средних толщин (до 8 мм) обе фазы обеспечивают импульсный перенос, но на второй тепловложение снижают для предотвращения перегрева свариваемого изделия (рис.8.21, б). На более толстом металле сварка начинается первой фазой с естественным струйным переносом, а продолжается второй фазой со строго дозированным мощным импульсным током (рис. 8.21, в).

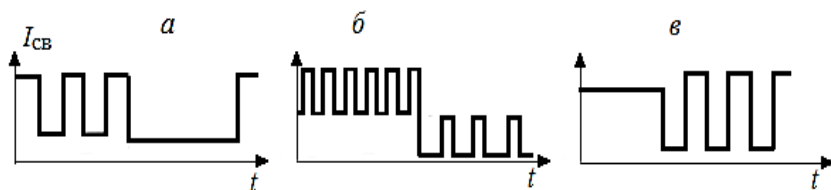


Рис. 8.21. Управляемый перенос по методу *Super Pulse*
(контроллер *Aristo U8/W8, ESAB*)

2) Система двойного модулирования *Pulse-on-Pulse (Lincoln Electric)* при сварке алюминия дугой обратной полярности кроме основного назначения — управления капельным переносом — выполняет еще и функцию очистки основного металла от оксидов и функцию управления погонной энергией дуги. Поэтому при постоянной частоте импульсов часть из них имеет большую длительность (и большую энергию), а часть — малую. Сначала идет пачка мощных импульсов с широким охватом свариваемых кромок дугой, что гарантирует качественную очистку. Затем следует пачка менее мощных импульсов, что позволяет уменьшить тепловложение в основной металл [133].

3) Система *Cold Weld*, т.е. холодный процесс (*Cloos*, Германия), обеспечивает периодическую смену полярности дуги после сбрасывания очередной капли для перераспределения тепла между ванной и электродом [134].

4) Система со двоекным импульсом описана в работе [135] (рис. 8.22). Первый импульс длительностью t_1 запускает механизм переноса. Его амплитуда $I_{н1}$ ниже критического тока. Поэтому анодное пятно занимает только часть нижней поверхности капли, а равнодействующая электродинамических сил направлена вверх (показана белой стрелкой) и подбрасывает каплю (ее движение показано черной стрелкой).

В последующем интервале длительностью t_2 ток снижается до базового значения $I_б$. При этом капля вовлекается в колебательное движение сначала по инерции вверх, а затем под действием силы тяжести вниз (показано двумя черными стрелками). Посредине интервала свободного колебания капли включается второй импульс тока длительностью t_3 . Его амплитуда $I_{н2}$ близка к критическому току, поэтому анодное пятно дуги охватывает всю каплю, и электродинамическая сила меняет направление на нижнее (показано белой стрелкой). Совместным действием электродинамической силы и силы инерции капля движется вниз (черная стрелка), отрывается от электрода и летит в ванну. Скорость отрыва капли вдвое ниже, чем при традиционной импульсно-дуговой сварке, а траектория полета ближе к оси электрода. Поэтому в сравнении с одноимпульсным переносом снижается разбрызгивание и улучшается формирование шва.

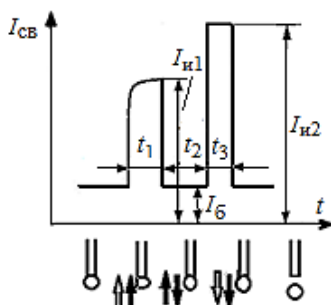


Рис. 8.22. Управление переносом со двоекным импульсом

5) Гибкая система сварки с прямоугольными импульсами описана в работе [136]. В отличие от вышеприведенных систем жесткого управления переносом здесь переход от одной стадии к другой происходит по сигналу двухуровневого датчика сварочного напряжения. На стадии базового тока перенос капельный, на стадии импульсного тока — струйный. Это и дало авторам основание называть такой перенос прерывисто-струйным. Базовый и импульсный токи поддерживаются каждый своим малоинерционным инверторным источником с вертикально падающими характеристиками, что гарантирует стабильность тока на обеих стадиях и высокую регулярность переноса.

8.4.2. Сварка с технологическими короткими замыканиями

Управление переносом при механизированной сварке в углекислом газе в отличие от сварки в аргоне наталкивается на серьезные технические трудности. В этом случае процесс плавления электрода не столь регулярен, а капля, как правило, не соосна электроду, так что пиковый импульс тока может привести к выбрасыванию капли за пределы ванны. Решение этой проблемы найдено путем внедрения гибкой системы управления. В отличие от жесткого при гибком управлении переход от одной стадии переноса к другой происходит по сигналу обратной связи датчика напряжения или тока, подтверждающему готовность капли к искусственному переносу. К тому же, гибкое управление стало возможным только с появлением мощных быстродействующих коммутирующих устройств — инверторов и транзисторных регуляторов.

Принцип гибкого управления переносом при сварке в углекислом газе поясняется на рис. 8.23 [137].

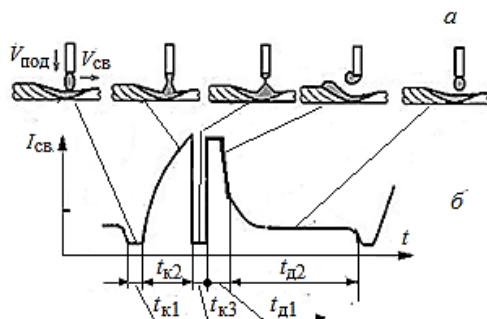


Рис. 8.23. Управление переносом электродного металла при сварке с технологическими короткими замыканиями: а — кинограмма процесса, б — схематичная осциллограмма тока

В начале короткого замыкания каплей в течение $t_{к1}$ ток снижают, что гарантирует слияние капли с ванной. Затем напряжение источника восстанавливают, что приводит к быстрому нарастанию тока короткого замыкания в течение $t_{к2}$ и перетеканию капли в ванну. В конце стадии короткого замыкания в течение $t_{к3}$ ток снова снижают, чтобы ограничить энергию газодинамического удара, сопровождающего разрыв перемычки между каплей и электродом. Вслед за этим в течение $t_{д1}$ напряжение источника восстанавливают или даже кратковременно повышают для надежного повторного зажигания дуги и быстрого образования следующей капли. Затем в течение интервала $t_{д2}$ для успокоения капли и ванны предусмотрено снижение напряжения и тока источника. При этом реактивное давление паров на каплю снижается, а сама капля приближается к ванне. К тому же и давление дуги на ванну снижается,

поэтому она подтекает под электрод. Все это способствует образованию контакта капли с ванной и следующему переносу. Такое управление переносом при сварке короткой дугой позволяет существенно снизить разбрызгивание при высокой устойчивости процесса.

Требования к параметрам отдельных стадий управляемого переноса при механизированной сварке с технологическими короткими замыканиями обоснованы в обзоре [138] ссылками на многочисленные публикации отечественных и зарубежных исследователей.

1) Стадия задержки короткого замыкания и весь микроцикл переноса капли начинается по сигналу датчика напряжения. Он фиксирует резкое снижение напряжения дуги до минимально возможного значения — при сварке в углекислом газе $U_{\text{дmin}} \approx U_{\text{ка}} = 19\text{--}20$ В. По сигналу датчика источник снижает ток до значения $I_{\text{к1}} = 10\text{--}40$ А на время $t_{\text{к1}} = 0,6\text{--}1$ мс.

2) Стадия неограниченного короткого замыкания с током $I_{\text{к2}}$ начинается по сигналу таймера $t_{\text{к1}}$, а заканчивается по новому сигналу датчика напряжения. Перетекание капли в ванну идет при ускоряющемся росте сопротивления и напряжения $U_{\text{к}}$ на перемычке. Поэтому пороговыми значениями для выключения тока $I_{\text{к2}}$ принимают напряжение $U_{\text{к}} = 8\text{--}12$ В или скорость его нарастания $dU_{\text{к}}/dt = 4\text{--}8$ кВ/с. В системе МП-управления, способной к вычислениям в масштабе реального времени, в качестве порогового сигнала перспективна расчетная величина активного сопротивления жидкой перемычки $R_{\text{к}}$. Ток $I_{\text{к2}}$ назначается максимальным для данного источника, а предпочтительная форма его импульса — прямоугольная, т.е. с максимально возможной скоростью нарастания тока короткого замыкания.

3) Стадия ограниченного короткого замыкания для предотвращения выплеска расплавленного металла может иметь ток $I_{\text{к3}} = 2\text{--}10$ А в течение $t_{\text{к3}} = 0,6\text{--}1$ мс, т.е. близкие к назначенным для стадии задержки.

4) Стадия повторного зажигания дуги и расплавления следующей капли характеризуется током $I_{\text{д1}}$ и длительностью импульса $t_{\text{д1}}$. При этом должна получиться небольшая сферическая капля размером, по разным рекомендациям, $d_{\text{к}} = (1\text{--}1,88)d_{\text{э}}$. Такая капля ориентирована точно по оси электрода и при коротком замыкании переносится в ванну почти без разбрызгивания в любом пространственном положении шва. Например, для получения капли диаметром 1,37 мм на проволоке диаметром 1,14 мм необходим импульс с параметрами $I_{\text{д1}} = 300$ А и $t_{\text{д1}} = 1,5$ мс [139]. Параметры импульса могут быть постоянными или изменяться в зависимости от сигналов обратных связей. В первом случае $I_{\text{д1}}$ и $t_{\text{д1}}$ настраиваются сварщиком или в синергетических системах вычисляются в зависимости от указанных сварщиком условий (диаметр и марка проволоки, защитный газ и т.д.). Во втором случае $I_{\text{д1}}$ может настраиваться постоянным, а $t_{\text{д1}}$ (и окончание им-

пульса) задаются моментом фактического достижения каплей требуемого диаметра независимо от возмущений по сети, подаче и вылету электрода.

5) Стадия успокоения сварочной капли характеризуется сравнительно малым током $I_{д2}$, достаточным при данном диаметре электрода только для сохранения устойчиво горящей дуги до момента нового переноса — $I_{д2} = I_{свин} = 30\text{--}100\text{ А}$ для проволок диаметром 0,8–1,6 мм.

Пример оценки гибкого управления переносом по другому алгоритму микроцикла был выполнен в работе [119] (рис. 8.24). Производилась автоматическая наплавка в углекислом газе от выпрямителя с транзисторным регулятором проволокой Св-08Г2С диаметром 1,6 мм. В каждой стадии микроцикла переноса одной капли варьировались значения как времени, так и тока. В результате выбирались значения параметров, обеспечивающие лучшую регулярность переноса. В качестве критерия регулярности (по терминологии автора, стабильности процесса) был принят коэффициент вариации частоты технологических коротких замыканий $k_{\text{вфк}}$. Оптимальными считались значения $k_{\text{вфк}}$ ниже 0,25. В составе микроцикла выделено три участка: 1 — переноса капли с коротким замыканием ($t_1\text{--}t_2$), 2 — образования следующей капли ($t_2\text{--}t_3$), 3 — движения капли к ванне ($t_3\text{--}t_4$).

На 1 участке сначала необходимо обеспечить слияние капли с ванной. Поэтому на время задержки $t_{зд} \approx 1\text{ мс}$ уменьшали ток до $I_{зд} = 60\text{--}100\text{ А}$. Оптимизация параметров задержки $t_{зд}$ и $I_{зд}$ при прочих благоприятных условиях обеспечивала $k_{\text{вфк}}$ от 0,09 до 0,13 — очень регулярный перенос. Интенсивность дальнейшего перетекания капли в ванну под действием сил поверхностного натяжения и электродинамической силы зависит от тока короткого замыкания $I_{кп}$, а также от скорости его нарастания $dI_{\text{к}}/dt \approx \Delta I/\Delta t$. При варьировании $dI_{\text{к}}/dt$ в интервале от 10 до 70 кА/с установлено, что при малой скорости регулярность невысокая из-за затяжки короткого замыкания, а при большой скорости регулярность ухудшается незначительно, хотя при этом увеличивается разбрызгивание. Оптимум $dI_{\text{к}}/dt$ приходится на интервал 20–50 кА/с, что хорошо согласуется с данными табл. 8.4 (при этом $k_{\text{вфк}}$ составляет около 0,25).

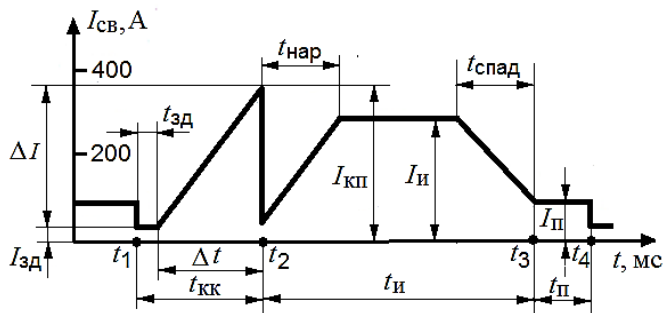


Рис. 8.24. Схематичная осциллограмма управляемого переноса при сварке с технологическими короткими замыканиями (проволока $\varnothing 1,6\text{ мм}$, 4 м/мин, 240 А) [119]

На 2 участке необходимо надежное восстановление дугового разряда и быстрое образование новой капли. Этому способствует увеличение как тока I_n , так и времени импульса t_n . Более крупная капля в начале следующего микроцикла быстрее переносится, но она же вероятней разбрызгивается. В качестве оптимума установлены значения $I_n = 330\text{--}450$ А и $t_n = 20\text{--}40$ мс, при которых регулярность последующего переноса наилучшая ($k_{\text{вфкк}} < 0,25$). Имеют значение также длительности нарастания $t_{\text{нар}}$ и спада $t_{\text{спад}}$ тока импульса.

На 3 участке происходит сближение капли с ванной. Влияние параметров этой паузы I_n и t_n на регулярность переноса менее значительно, поэтому автор его не анализировал.

Итак, небольшие отличия этого алгоритма от *Требований*, сформулированных в более позднем обзоре [138] — это значение $I_{к1}$, отсутствие стадии ограниченного короткого замыкания с временем $t_{к3}$, неотработанность параметров дуговой стадии успокоения капли с током $I_{д2}$. Как видно, эти отличия не сказались на высокой оценке результатов испытания. Отсюда следует вывод о большой пользе от внедрения любых гибких систем управления переносом. А о высокой перспективности дальнейшего совершенствования таких систем говорят нижеприведенные примеры.

Разновидности систем программного управления переносом. Выполнено большое количество исследований управляемого переноса при сварке с технологическими короткими замыканиями. Весомый вклад в решение этой проблемы внесли отечественные ученые [119, 137, 140–142]. Большинство крупных производителей сварочного оборудования разработали собственные системы. Рассмотрим некоторые из них.

1) Система *STT* (*Square Tension Transfer*), т.е. с переносом силами поверхностного натяжения (*Lincoln Electric*) [143], обеспечивает осциллограмму тока, приведенную на рис. 8.25. Общая конфигурация осциллограммы подобна типовой, показанной на рис. 8.23, а назначение и параметры отдельных стадий микроцикла совпадают с приведенными выше *Требованиями* ($t_1 = 0,5\text{--}0,8$; $t_2 = 1\text{--}2,5$; $t_3 = 0,7\text{--}1$; $t_4 = 1\text{--}2$ мс; I_6 до 150 А; $I_{кп}$ до 450 А).

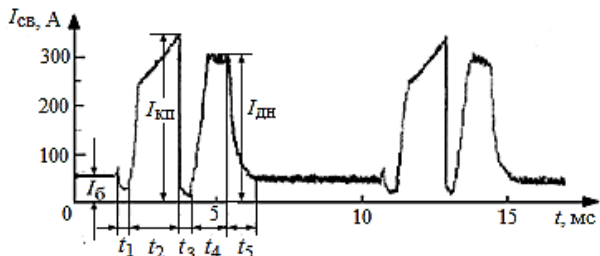


Рис. 8.25. Осциллограмма тока при сварке по методу *STT* (*Invertex STT II*, углекислый газ, проволока $\varnothing 1,14$ мм, $I_6 = 57$ А, $I_{кп} = 317$ А) [139]

Поэтому покажем только особенности настройки параметров режима. Отдельными регуляторами настраивают базовый I_6 и пиковый $I_{кп}$

токи. Потенциометром «спад» настраивают длительность t_5 снижения тока от $I_{\text{дн}}$ до I_6 за счет чего можно изменить размер переносимой капли. Тумблером «диаметр электрода» переключаются уставки параметров микроцикла (t_1, t_2, t_3, t_4) в зависимости от диаметра электрода (меньше или больше 1,1 мм). Тумблером «материал электрода» меняют уставку t_2 длительности полного короткого замыкания (для нержавеющей стали — больше). Сотрудники Лаборатории технологических исследований фирмы *Lincoln Electric* первыми довели до промышленного внедрения работоспособную систему управления переносом *STT* [144].

2) Система *Wise Root (Kemppi, Финляндия)* адаптирована к выполнению в углекислом газе корневого прохода при сварке трубопроводов, но в отличие от системы *STT* обеспечивает стабилизацию тока в обеих стадиях процесса (короткого замыкания и дуги) [145]. Достижимое этим успокоение ванны позволяет выполнять качественную сварку по зазору до 10 мм.

3) Система *Speed Root (Lorch, Германия)*. Регулятор согласованно с волнообразными движениями сварочной ванны периодически ограничивает ток в момент сближения капли с ванной. Это приводит к втягиванию капли в ванну на стадии короткого замыкания практически без разбрызгивания. Такое управление способствует успокоению ванны и формированию ровного корневого валика как с лицевой, так и с обратной стороны [146].

4) Приемами жесткого программного управления так же удастся организовать сложный цикл, подобный приведенному на рис. 8.23, хотя и уступающий ему по возможностям настройки [147]. Для этой цели используют тиристорный трехфазный выпрямитель с системой несимметричного фазового управления и низковольтную подпитку. Обычно тиристоры в катодной группе запускают на полнофазное включение, а тиристоры анодной группы включают с большой задержкой. Поэтому на осциллограмме напряжения возникают провалы (рис. 8.26). При этом капля и ванна сближаются, что может запустить механизм перенос. В случае касания капель ванны вступает в действие низковольтная подпитка, ранее запертая высоким напряжением основного источника. На осциллограмме тока при этом виден крутой пик тока короткого замыкания, способствующий быстрому переносу капли в ванну. В описанном алгоритме управления частота запуска 150 Гц, хотя реальная частота переносов несколько ниже. При более редких запусках системы можно

получить и другие частоты, дольные от 300 Гц — 125, 100, 87,5, 75, 67,5, 60, 50 и др.

В технологическом эксперименте с питанием от тиристорного выпрямителя ВДУ-306МТ при сварке в нижнем положении (режим №8 по ГОСТ 25616-83) получена высокая частота коротких замыканий каплями $f_{\text{кк}} = 105$ Гц при достаточной их регулярности (рис. 8.26). Длительность коротких замыканий $t_{\text{кк}} = 2,3 \pm 0,4$ мс (коэффициент вариации $k_{v\text{кк}} = 0,17$) что косвенно свидетельствует о малом и одинаковом размере переносимых капель. Итогом регулярного переноса становится и малое разбрызгивание — ψ_p не более 2,5 %.

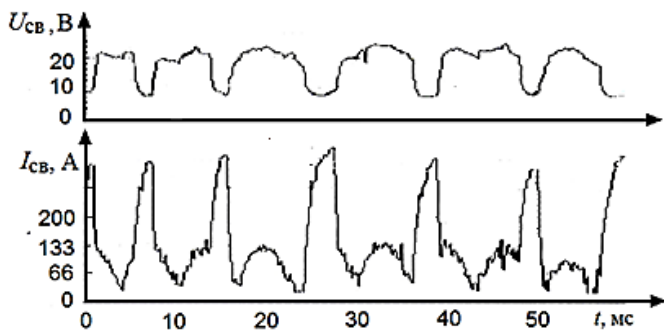


Рис. 8.26. Механизированная сварка с жестким программным управлением переносом (ВДУ-306МТ + ПДГО-512, CO_2 , Св-08Г2С Ø1,2 мм, 4,5 м/мин, 150 А, 19 В)

Сварка с вынужденными короткими замыканиями ВКЗ — близкий по физической сущности метод жесткого управления — осуществлен с помощью выпрямителей ВД-306ДК и ВД-506ДК, благодаря наличию у них несимметричного диодно-тиристорного блока [59].

8.5. Управление переносом с помощью импульсного привода подачи

Механические импульсные воздействия на электрод с целью управления переносом капель могут создаваться с использованием следующих приемов:

- колебания мундштука (вибродуговая наплавка),
- импульсная подача проволоки электромагнитным приводом,
- импульсная подача проволоки моторным приводом.

Дополнительные возможности управления переносом предоставляет сочетание механического и электрического воздействий [148,149].

8.5.1. Импульсная подача проволоки электромагнитным приводом

Первоначально электромагнитный привод разрабатывался в качестве альтернативы моторному с целью уменьшения размеров и массы подающего механизма. Но в процессе его эксплуатации было выяснено еще одно достоинство — регулярный мелкокапельный перенос.

Электромагнитный двухзахватный привод (рис. 8.27, а) имеет обмотку 4, по которой пропускаются кратковременные импульсы тока. При каждом импульсе возникает магнитный поток, замыкающийся по корпусу 3, сердечнику 1, якору 5 и крышке 6. Электромагнитная сила, создаваемая потоком, втягивает якорь внутрь обмотки до упора в коническое углубление в сердечнике. Соединенный с якорем подвижный толкающий захват 8 также перемещается влево и своей внутренней конической поверхностью давит на шарики 9, которые зажимают сварочную проволоку 10 и продвигают ее к месту сварки. После выключения тока якорь под действием плоской пружины 7 возвращается в исходное правое положение. На этом этапе вступает в работу неподвижный удерживающий захват 2, который зажимает проволоку и не дает ей перемещаться вправо.

Средняя скорость подачи проволоки зависит от шага подачи и частоты импульсов. Такой механизм подачи в 2–3 раза меньше и легче моторного. Перенос электродного металла совпадает с приближением проволоки с каплей к ванне и поэтому четко синхронизирован с частотой импульсов электромагнита.

Разработано большое количество приводов с односторонним и двухсторонним захватом [150, 226]. Почти все они имеют невысокую надежность из-за проскальзывания проволоки в толкающих захватах.

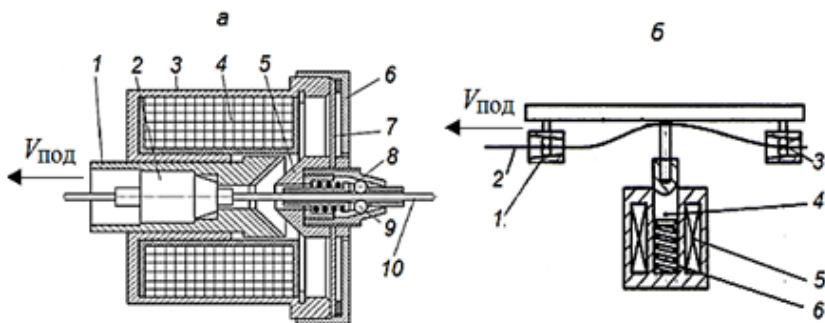


Рис. 8.27. Электромагнитный привод подачи: а — с двухсторонним захватом, б — с квазиволновым преобразователем

Электромагнитный привод с квазиволновым преобразованием поперечного движения якоря электромагнита в продольное перемещение проволоки разработан специально для управляемого переноса электродного металла [151]. Принцип его действия заключается в следующем (рис. 8.27, б). При выключенном электромагните 5 его якорь 4 действием пружины 6 выгибает сварочную проволоку 2 вверх. При этом левый захват 1 зажимает проволоку, что приводит к ее вытягиванию только из кассеты, находящейся справа от привода. При последующем включении электромагнита и движении его якоря вниз проволока распрямляется, но при этом она зажимается уже правым захватом 3, в результате чего подается на шаг в горелку через разжимающийся левый захват. Обычно образование капли на торце электрода происходит в интервале горения дуги при выключенном электромагните, а перенос капли — в интервале короткого замыкания при включенном электромагните. Процесс управления переносом может быть интенсифицирован наложением синхронного импульса тока от источника. Такая система, управляемая обратными связями по току и напряжению, описана в работе [152].

В качестве примера приведем режим сварки стыкового соединения С2 толщиной 2,2–4 мм проволокой диаметром 0,8 мм: частота импульсов подачи 60–70 Гц, шаг подачи 1,6 мм, напряжение дуги при начале модулирования тока 22 В, стабилизация тока 110 А, задержка токового импульса 0,6 мс.

8.5.2. Импульсная подача проволоки моторным приводом

Такое управление переносом стало эффективным с появлением практически безынерционных вентильных приводов, позволяющих не только осуществлять подачу проволоки импульсами с частотой до 100 Гц, но и менять направление подачи с такой же частотой.

Вентильный привод (транзисторный трехканальный генератор импульсных сигналов + бесколлекторный двигатель) (рис. 8.28, а) не имеет редуктора, здесь подающий ролик насажен непосредственно на вал двигателя. Сигнал в задающем устройстве ЗУ имеет форму импульсов, настраиваемых по знаку, амплитуде, длительности и частоте. Кроме ЗУ в релейный регулятор тока РРТ подают сигналы обратных связей от датчиков положения ДП и скорости ДС. Регулятор РРТ генерирует импульсные сигналы для включения шести транзисторов силового блока СБ. Транзисторы попарно управляют работой трех обмоток (фаз а, б, с) бесколлекторного двигателя БД. От частоты следования импульсов зависит частота вращения двигателя ω и скорость подачи проволоки $V_{\text{под}}$, а от последовательности подачи сигналов (а–б–с или с–б–а) — направление вращения. При конструировании БД принимаются меры для сни-

жения момента инерции его ротора. Для экспериментальной модели вентильного привода, описанного в работе [92], получены следующие характеристики его быстрогодействия: частота импульсного вращения 70–80 Гц, угловое ускорение вращения ротора 13000 с^{-2} . Алгоритм программного изменения скорости подачи (тахограмма), необходимый для управления переносом капель с такой частотой, показан на рис. 8.28, б. Этот алгоритм вводится в ЗУ с раздельной настройкой параметров импульса ($V_{\text{и}}, t_{\text{и}}$) и паузы ($V_{\text{п}}, t_{\text{п}}$). Возможен и алгоритм с попеременными подачей и отводом проволоки от сварочной ванны, у которого настраиваются параметры реверса ($V_{\text{р}}, t_{\text{р}}$). Наконец возможен алгоритм с чередованием трех этапов — импульса, паузы и реверса.

При сварке короткой дугой, т.е. при использовании источника со сравнительно низким напряжением, процесс сопровождается частыми технологическими короткими замыканиями капли на ванну. При этом перенос происходит по окончании импульса подачи действием сил поверхностного натяжения между каплей и ванной. А при сварке длинной дугой капля не способна перемкнуть межэлектродный промежуток. Здесь перенос осуществляется с участием силы инерции $F_{\text{и}} = m_{\text{к}} dV_{\text{под}}/dt$, действующей на каплю при остановке импульса подачи проволоки. Расчетное значение ускорения $dV_{\text{под}}/dt$, достаточное для принудительного переноса капли диаметром $d_{\text{к}} = d_3 = 1,2\text{--}1,6 \text{ мм}$ составляет:

- для алюминиевой проволоки Св-АМг в аргоне — $15\text{--}25 \text{ м/с}^2$;
- для проволоки Св-08Г2С в аргоне — $30\text{--}40 \text{ м/с}^2$;
- для проволоки Св-08Г2С в углекислом газе — $50\text{--}60 \text{ м/с}^2$ [226].

Максимальные из этих значений достижимы только у вентильных приводов подачи, минимальные — могут быть получены и с помощью одностороннего электромагнитного привода.

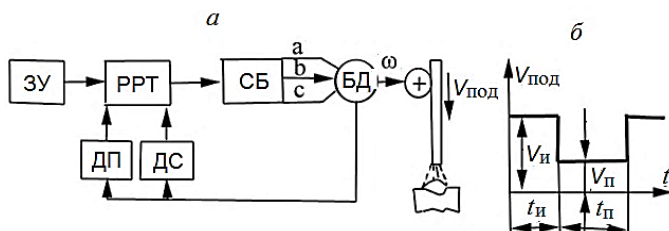


Рис. 8.28. Вентильный привод импульсной подачи проволоки:
а — функциональная схема, б — принцип действия

Независимыми параметрами режима являются частота $f_{и}$ и шаг $h_{и}$ импульсов подачи. Средняя скорость подачи зависит от них — $V_{под} = f_{и}h_{и}$, а по сложению этапов соответствует уравнению

$$V_{под} = (V_{и}t_{и} + V_{п}t_{п} - V_{р}t_{р}) / (t_{и} + t_{п} + t_{р}).$$

Частоту $f_{и}$ устанавливают близкой к естественной частоте $f_{к}$ капельного переноса безимпульсного процесса или к частоте $f_{кк}$ технологических коротких замыканий при сварке короткой дугой. Шаг импульсной подачи $h_{и}$ является самым эффективным параметром настройки, поскольку от него зависит глубина проплавления, а поэтому и минимальная толщина свариваемого металла (от 0,5 мм), а также характер переноса и качество шва [154, 155]. В качестве примера приведем параметры режима сварки проволокой Св-08Г2С диаметром 1,2 мм: частота 30 Гц, 160–170 А, 22–23 В (возможный диапазон настройки шага — 1–5,5 мм).

Система с реверсированием подачи CMT (Cold Metal Transfer), т.е. с переносом «холодного» электродного металла, созданная фирмой *Fronius* (Австрия) — хорошо отработанная версия гибкого программного управления переносом с помощью импульсного моторного привода [153]. Здесь используется толкающе-тянущая система подачи проволоки. Причем более мощный толкающий механизм рассчитан на подачу проволоки из кассеты по гибкому шлангу. Он проталкивает проволоку с постоянной скоростью, поскольку регулярная импульсная подача была бы не возможна из-за демпфирующего действия длинного шланга. Тянувший реверсивный двигатель вмонтирован в рукоятку горелки. А для согласования работы двух механизмов в гибкий шланг вставлен компенсатор, в котором между импульсами собирается небольшой запас проволоки.

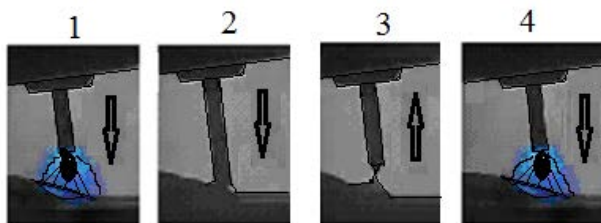


Рис. 8.29. Кинограмма переноса электродного металла при импульсной подаче проволоки (полуавтомат *Trans Puls Synergic 3200 CMT*)

Сварочный процесс протекает с периодическим повторением двух стадий — дуги и короткого замыкания (рис.8.29). На стадии дугового

разряда происходит быстрая подача, опережающая плавление проволоки (поз.1). С момента касания проволокой ванны (2) датчик напряжения обнаруживает короткое замыкание, и система управления дает команду источнику на резкое снижение тока. Благодаря этому происходит спокойный перенос электродного металла в ванну только за счет сил поверхностного натяжения. Одновременно подается команда на реверсирование привода. Поэтому проволока вытягивается из ванны (3). Затем напряжение источника восстанавливается, что приводит к повторному зажиганию дуги. Далее по сигналу датчика напряжения привод снова реверсируется (4). В результате проволока станет подаваться к ванне, и далее процессы повторятся. Такое гибкое управление — с переключениями по готовности капли к переносу — эффективней жесткого программного управления с постоянной частотой механических импульсов. Здесь не нужна предварительная настройка частоты. Такая система лучше отрабатывает возмущения по вылету электродной проволоки, по профилю свариваемых заготовок и т.д.

На рис. 8.30, *а* приведены осциллограммы напряжения и тока при сварке с импульсной подачей проволоки. Как видно, в интервалах короткого замыкания ток благодаря синхронному переключению источника резко снижается. Если же учесть, что и длительность короткого замыкания (КЗ) близка к длительности горения (Дуга), то в сравнении с непрерывным процессом мощность тепловыделения снижается почти в 2 раза. Это и дало основание авторам называть такой процесс сваркой с переносом холодного металла. Область ее применения — тонкий металл (от 0,3 мм), и особенно металл с защитными покрытиями. Другое важное достоинство — почти полное отсутствие брызг, поскольку перенос происходит без дуги при очень низком токе короткого замыкания.

В усовершенствованном *CMT Advanced*-процессе (рис. 8.30, *б*) обеспечивается еще и периодическая смена полярности дуги. Независимая настройка количества импульсов дуги обратной и прямой полярности (на рисунке 2+2) придает системе дополнительные возможности распределения тепловложения между проволокой и заготовками. При сварке алюминия в аргоне в случае преобладания количества импульсов обратной полярности (+ на электроде) улучшается очистка заготовок от оксидов и сильнее плавится основной металл. В случае преобладания импульсов прямой полярности (– на электроде) интенсифицируется плавление проволоки.

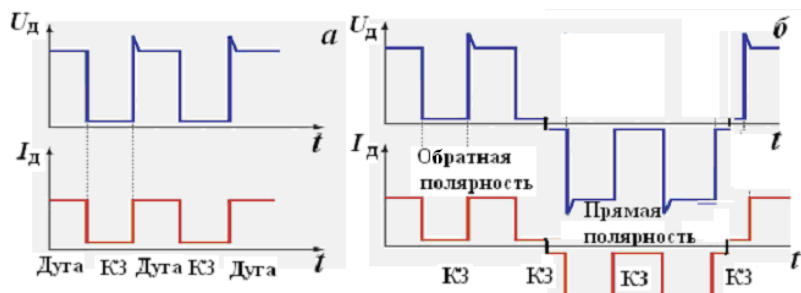


Рис.8.30. Схематичные осциллограммы при сварке по методу СМТ (а) и СМТ Advanced (б)

Пример оценки переноса при импульсной подаче проволоки по методу СМТ описан в работе [85]. Были проверены три режима — с базовым током 70, 120 и 170 А. Первый из них — заведомо неустойчивый по внешним проявлениям, следующие — устойчивые. Как уже отмечалось ранее, наиболее эффективна объективная оценка процесса по характеристикам стабильности параметров — их коэффициентам вариации (табл. 8.9).

Таблица 8.9.
 Характеристики переноса при импульсной подаче
 электродной проволоки
 (полуавтомат Trans Puls Synergic 3200 СМТ, проволока
 Св-08Г2С Ø 1,2 мм, 82 % Ar+18 % CO₂) [131]

Коэффициенты вариации:	Режим		
	неустойчивый	устойчивый	устойчивый
	$I_6=70$ А	$I_6=120$ А	$I_6=170$ А
частоты коротких замы- каний $k_{v\text{КЗ}}$	0,23	0,11	0,13
длительности коротких замыканий $k_{v\text{тКЗ}}$	0,88	0,22	0,23
тока дуги k_{vI_d}	0,47	0,12	0,10
длительности горения дуги $k_{v\text{тд}}$	0,56	0,11	0,12

Наиболее важной характеристикой регулярности переноса является частота коротких замыканий каплями $f_{\text{кк}}$. В отличие от систем с жестким управлением переносом, где частота постоянна по самому принципу действия (задается таймером $f_{\text{кк}}$), при сварке по методу *СМТ* высокая стабильность частоты свидетельствует об идеальной согласованности электрических процессов с тепловыми процессами плавления электрода. Косвенно такая стабильность свидетельствует и об одинаковом размере капель, переносимых в каждом микроцикле. Эта стабильность в устойчивом процессе характеризуется достаточно малым значением $k_{v/f_{\text{кк}}} = 0,11\text{--}0,13$. При сварке на устойчивых режимах стабильны и длительности обеих стадий цикла ($k_{v/t_{\text{кк}}} = 0,22\text{--}0,23$, а $k_{v/I_{\text{д}}} = 0,11\text{--}0,12$). Стабильность тока на стадии дуги тоже высока ($k_{v/I_{\text{д}}} = 0,10\text{--}0,12$).

При сопоставлении названных критериев переноса для устойчивого и неустойчивого процессов особенно выразительны гистограммы распределения плотности вероятности для этих критериев (рис. 8.31). Видно, что гистограммы всех критериев для неустойчивого процесса существенно размыты, что говорит о большом разбросе показаний.

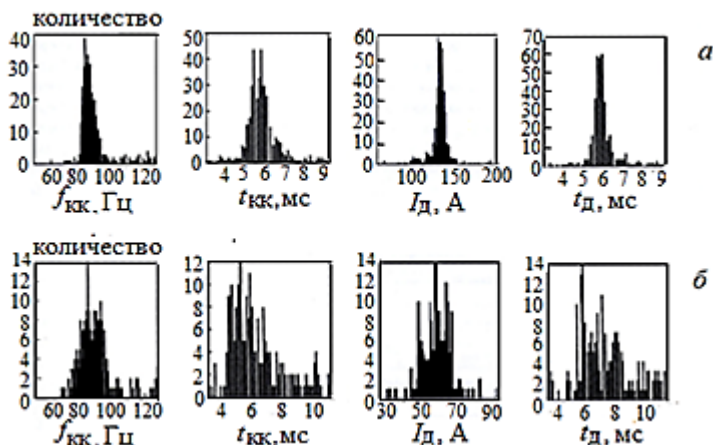


Рис. 8.31. Гистограммы характеристик переноса при импульсной подаче электродной проволоки: а — устойчивый процесс, б — неустойчивый (полуавтомат Trans Puls Synergic 3200 CMT, Св-08Г2С Ø 1,2 мм, 82 % Ar + 18 % CO₂)

9. ПЕРЕНОС ЭЛЕКТРОДНОГО МЕТАЛЛА ПРИ РУЧНОЙ СВАРКЕ

9.1. Феноменология процесса переноса при ручной сварке

9.1.1. Механизм и виды переноса электродного металла.

Процессы образования и переноса капли при ручной сварке покрытым электродом подобны описанным выше при использовании проволоочного электрода (рис. 9.1). Капля образуется за счет плавления торца электродного стержня благодаря концентрированному выделению теплоты в активном пятне дуги (катодном или анодном). При сварке в нижнем пространственном положении капля вытягивается вниз силой тяжести, но некоторое время удерживается на электроде силами поверхностного натяжения, а также силой реактивного давления паров и газов, выделяющихся с активного пятна [156]. Одновременно теплотой дуги плавится электродное покрытие с образованием жидкого шлака, часть которого в виде пленки обволакивает каплю. Из нерасплавленной части покрытия на торце электрода образуется коническая втулочка.

После образования шейки между каплей и электродом движение капли ускоряется действием электродинамической силы — и наконец, капля отрывается от электрода и переходит в сварочную ванну. Часть расплавленного металла остается на торце электрода, с его участием начнется образование новой капли, и далее процессы плавления и переноса циклически повторяются.

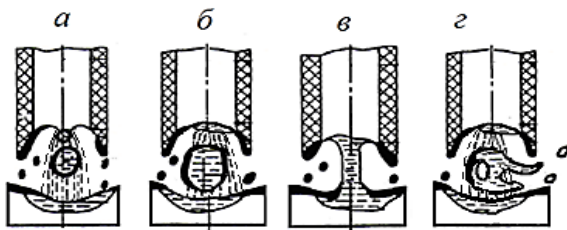


Рис. 9.1. Виды переноса электродного металла при сварке покрытым электродом

Отличительные особенности переноса при ручной сварке покрытыми электродами заключаются в следующем:

— как правило, размер капель выше, а частота переноса ниже, чем при сварке проволоочным электродом;

— пленка жидкого шлака на капле снижает поверхностное натяжение на границах сред, что способствует уменьшению размеров переносимых капель;

— коническая втулочка покрытия на торце электрода как сопло концентрирует кольцевой газовый поток, способствуя измельчению капель и их движению вдоль оси электрода;

— некачественное или сырое покрытие провоцирует внутренние взрывы капель и повышенное разбрызгивание электродного металла за пределы сварочной ванны.

Виды переноса, наблюдающиеся при ручной сварке покрытыми электродами, перечислены ниже.

1) Мелкокапельный перенос ($d_k < 0,5d_3$) характерен для электродов с рутиловым покрытием, например марок АНО-4, ОЗС-12, ОК 46 (рис. 9.1, а). Это наиболее благоприятный вид переноса — при нем меньше перегрев капель и меньше разбрызгивание.

2) Крупнокапельный перенос ($d_k \geq 0,5d_3$) характерен для электродов с основным покрытием, например, марок АНО-11, УОНИ 13/55, ОК 52.70, LB 52U (рис. 9.1, б). Значительному росту капли до ее отрыва от электрода способствуют малый сварочный ток, длинная дуга и особенно переход к вертикальному или потолочному пространственному положению шва.

3) Перенос с технологическими короткими замыканиями встречается при сварке короткой дугой, особенно электродами с основным или целлюлозным покрытием (рис. 9.1, в). В этом случае перенос электродного металла происходит за счет его втягивания в ванну действием сил поверхностного натяжения. Завершается перенос разрывом перемычки жидкого металла между каплей и электродом под действием электродинамической силы, а также за счет взрыва перемычки из-за ее перегрева. Чрезмерно интенсивное разрушение перемычки может привести к значительному разбрызгиванию электродного металла за пределы сварочной ванны. Наоборот, в случае затяжки короткого замыкания перемычка остывает и затвердевает — электрод «прилипает» к ванне.

4) Взрывообразный перенос происходит в результате интенсивного выделения газов и паров в объеме капли (рис. 9.1, г). Кроме недопустимых случаев сварки сырыми или непрокаленными электродами такой перенос может обнаружиться при использовании качественных электродов с рудно-кислым или целлюлозным покрытием.

Циклический характер плавления электродного металла иллюстрируется графиком, полученным при расшифровке скоростной рентгенокиносъемки (рис. 9.2). После отделения предыдущей капли на торце электрода остается некоторое количество расплавленного металла с начальной массой $m_{\text{нач}}$. Затем в течение времени $t_{\text{обр.к}}$ идет образование

капли за счет непрерывного, практически равномерного увеличения массы расплавленного металла до конечной величины $m_{\text{кон}}$. Потом капля массой $m_k = m_{\text{кон}} - m_{\text{нач}}$ отделяется от электрода и движется в сторону ванны в течение времени $t_{\text{дв.к}}$. Длительность полного цикла переноса, зафиксированная в экспериментах, может составлять от 0,05 до 1 с, хотя в типичных условиях сварки диапазон длительностей несколько уже — $T_k = 0,1\text{--}0,7$ с. Но обычно интенсивность переноса характеризуют обратной величиной — частотой переноса капель $f_k = 1/T_{k.\text{ср.}}$. Типичные значения $f_k = 1,5\text{--}10$ Гц.

В описанном эксперименте (рис. 9.2) для повышения четкости рентгенокино съемки пришлось использовать толстый электрод диаметром 8 мм. Поэтому зафиксированные здесь размеры капель сравнительно велики — диаметр d_k составляет 6,5–9 мм, а масса — 1–2,5 г. В реальных же условиях сварки электродами диаметром от 2 до 6 мм диаметр капель $d_k = 0,5\text{--}6$ мм. Доля металла переносимой каплей массой m_k в расплавленном металле электрода $m_{\text{кон}}$ составляет от 5 до 80 %.

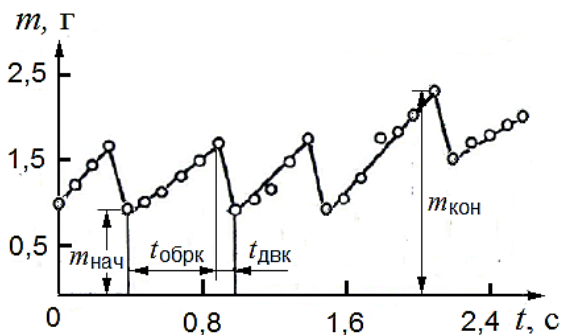


Рис. 9.2. Кинетика плавления и переноса электродных капель (преобразователь Kjellberg S II, электрод УОНИ 13/45 Ø8 мм, 313 А, 26 В, обратная полярность) [9]

9.1.2. Приемы воздействия на перенос

Рассмотрим приемы, придающие переносу благоприятный характер — регулярный, мелкокапельный, направленный по оси электрода, без чрезмерного разбрызгивания и прилипания электрода к ванне.

Технологические приемы.

1) Для уменьшения размеров капель [9]:

— увеличивают ток и уменьшают диаметр электрода, причем резкое измельчение капель происходит при плотности тока $j_s > 13$ А/мм², при которой в переносе начинает доминировать электродинамическая сила;

— вводят в состав электродных покрытий компоненты, снижающие поверхностное натяжение, а также уменьшающие температуру дуги

и реактивное противодействие на каплю (FeO , CaO , MgO , TiO_2), и ограничивают содержание компонентов, увеличивающих поверхностное натяжение и температуру (CaF_2 , SiO_2);

— формируют двухслойное основное покрытие, чтобы во внутреннем слое преобладал мрамор (CaO , MgO) для измельчения капель, а в наружном — флюорит (CaF_2) для качественного формирования шва;

— используют дугу прямой полярности, потому что усиливающиеся при этом хаотические перемещения активного (катодного) пятна по поверхности капли способствуют сбрасыванию с нее мелких частиц электродного металла.

2) Разбрызгивание электродного металла зависит от режима сварки, а также от типа и качества покрытия, поэтому:

— сварочный ток устанавливают на технологически обоснованном уровне, не допуская значительного превышения им величины $I_{\text{св.норм}}$, поскольку, например, в конвенциональных источниках с увеличением сварочного тока пропорционально увеличивается пиковый ток короткого замыкания капель $I_{\text{кп}}$ и, следовательно, интенсивность ее переноса;

— тип электродного покрытия принимают с учетом факторов, влияющих на размер капель и вид переноса (наибольшее разбрызгивание у электродов с целлюлозным покрытием, наименьшее — с рутиловым покрытием);

— обязательна прокалка электродов с повышенной гигроскопичностью покрытия.

3) Прилипание наблюдается при сварке с технологическими короткими замыканиями на низких режимах и зависит также от пространственного положения и типа электродного покрытия, поэтому:

— не допускают чрезмерного уменьшения тока;

— используют электроды с мелкокапельным характером переноса;

— при возможности кантовки свариваемого изделия предпочитают выполнение швов в нижнем положении.

Электротехнические приемы:

— оптимизация переходных электрических процессов (ускорение или замедление роста тока при переносе, например, выбором и настройкой индуктивности сварочной цепи);

— искусственное форсирование дуги при сварке с короткими замыканиями для увеличения электродинамической силы;

— использование естественных пульсаций выпрямленного тока для интенсификации переноса (но умеренные пульсации тока трехфазного диодного выпрямителя практически не влияют на перенос, тем более это относится к современным источникам с не полностью сглаженными высокочастотными пульсациями тока).

9.1.3. Методы изучения переноса электродного металла

К таким методам относят: выделение и взвешивание капель, рентгено- кино- и видеосъемку, осциллографирование тока и напряжения.

Искусственное выделение капель электродного металла выполняется при расплавлении горизонтально расположенного электрода дугой, горющей на вертикальной медной или графитовой пластине. Возможна наплавка и при более естественном вертикальном положении электрода 2 на быстро вращающийся (около 1000 об/мин) диск 1 (рис. 9.3, а). В обоих случаях капли расплавленного металла 3 падают в ванну 4 с водой. Затем их просушивают, освобождают от шлака и просеивают через несколько сит, разделяя по размерам. Для разделения очищенных от шлака капель можно использовать набор сит с калибрами 0,5; 0,8; 1; 1,4; 2; 2,8 и 4,75 мм [157]. Например, при использовании электродов ОММ-5 диаметром 5 мм диаметр капль может достигать 5,5 мм, а масса — 0,6 г. Причем с увеличением тока до 370 А диаметр капль быстро уменьшается, а массовая доля мелких капль диаметром менее 1 мм увеличивается до 60 % [158].

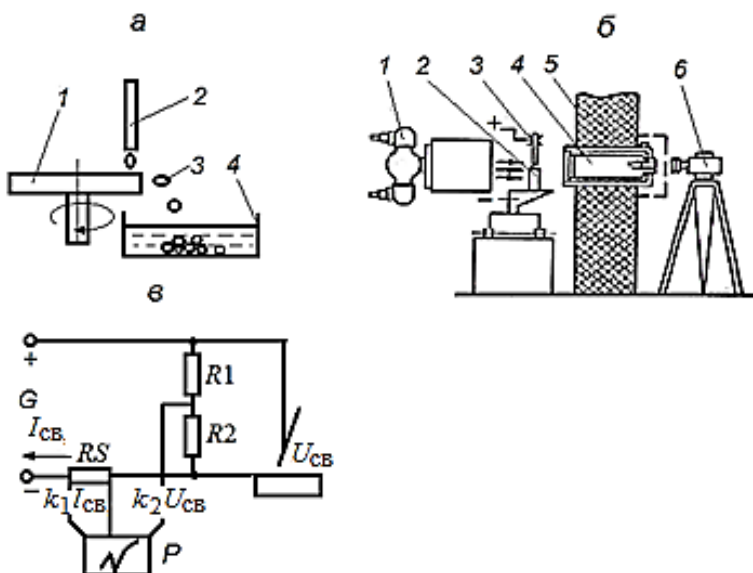


Рис. 9.3. Методы изучения переноса электродного металла

Кино- и видеосъемка дают информацию о размерах и скорости движения отделившейся капли по ее силуэту на кинограммах сварочного процесса. Но при сварке покрытым электродом полное представление об образовании и росте капли на торце электрода дает только ско-

ростная рентгеновская киносъемка, позволяющая наблюдать силуэт твердого и жидкого электродного металла под слоем покрытия, в частности внутри его конической втулки. Схема съемки показана на рис. 9.3, б [159], а ее результаты приведены выше — на рис. 9.2. Излучение рентгеновской трубки 1 направляется на дугу, горящую между покрытым электродом 3 и вертикально установленной перемещающейся пластиной 2. Теневое рентгеновское изображение дуги с электродом и каплями переносимого металла подается в электронно-оптический преобразователь 5 для повышения яркости и четкости. И уже с экрана преобразователя камера 6 выполняет скоростную (более 1000 кадров в секунду) киносъемку. Персонал и киноаппаратура защищены от рентгеновского излучения экраном 4. Главный недостаток метода — сложность и уникальность аппаратуры и трудоемкость обработки результатов.

Осциллографирование тока и напряжения — наиболее доступный и распространенный, хотя и косвенный метод оценки капельного переноса (рис. 9.3, в). Источник питания G снабжает дугу энергией с параметрами $I_{\text{св}}$ и $U_{\text{св}}$. Сигнал сварочного тока преобразуется измерительным шунтом RS и в виде напряжения $k_1 I_{\text{св}}$ подается на осциллограф. Сигнал сварочного напряжения $U_{\text{св}}$ может быть понижен делителем $R1, R2$ и подан на осциллограф в виде напряжения $k_2 U_{\text{св}}$. Двухканальный запоминающий осциллограф P обеспечивает синхронизацию обоих сигналов, фильтрацию помех и выделение той части сигналов, которая несет полезную информацию. Этот метод широко используется для анализа капельного переноса при сварке с технологическими короткими замыканиями.

9.2. Непосредственные критерии переноса при ручной сварке

9.2.1. Массо-размерные характеристики переноса

Масса m_k , диаметр d_k и частота f_k переноса капель — непосредственные критерии процесса переноса электродного металла. Типичные значения критериев приведены в табл. 9.1.

С учетом доли капель в общей массе перенесенного электродного металла ($k_{\text{кап}} = 0,8\text{--}0,95$) очевидна связь этих критериев с производительностью плавления:

$$k_{\text{кап}} \alpha_p I_{\text{св}} = m_k f_k = \gamma (\pi d_k^3 / 6) f_k.$$

Из уравнения следует, что измельчение капель обычно приводит к пропорциональному увеличению частоты их переноса.

Таблица 9.1.

Непосредственные критерии переноса электродного металла при ручной сварке покрытыми электродами [25]

Марка электрода	АНО-4	ЦМ-7	УОНИ 13/45
Тип покрытия	рутиловое	рудно-кислос	основное
Диаметр электрода, мм	4	4	4
Полярность дуги	обратная	прямая	обратная
Сварочный ток, А	190	110–120	150–165
Сварочное напряжение, В	24–26	23–28	24–26
Масса капли m_k , г	0,04–0,12	0,15–0,25	0,2–0,3
Масса расплавленного металла электрода $m_{\text{кон}}$, г	0,1–0,2	0,25–0,35	0,3–0,4
Частота переноса f_k , Гц	5–10	1,7–2,9	1,4–1,7

9.2.2 Электрические характеристики переноса с технологическими короткими замыканиями

Длительность $t_{\text{кк}}$, частота $f_{\text{кк}}$ и пиковый ток $I_{\text{кп}}$ коротких замыканий каплями, а также длительность интервалов горения дуги t_d между ними — непосредственные критерии процесса переноса с технологическими короткими замыканиями каплями электродного металла на ванну. Такие критерии переноса широко распространены в практике испытаний сварочных материалов, технологий и оборудования, поскольку легко выявляются при осциллографировании. Названные характеристики показаны в качестве примера на осциллограммах сварочного тока и напряжения (рис. 9.4). Здесь $t_{\text{кк}} = 8,2$ мс, $t_d = 88$ мс, $T_{\text{кк}} = 96,2$ мс, $f_{\text{кк}} = 10,4$ Гц, $I_{\text{кп}} = 162$ А.

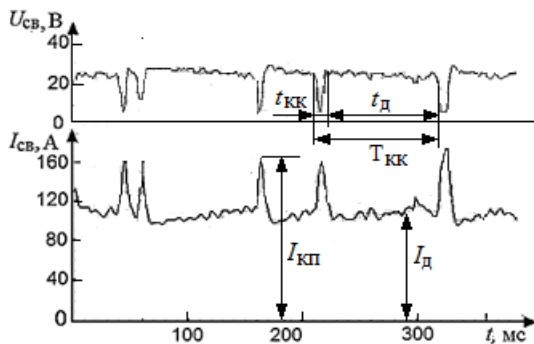


Рис. 9.4. Электрические характеристики переноса при ручной сварке покрытым электродом (инверторный источник Buddy Arc 180, опытный электрод УЭЗ Ø 3 мм, 110 А, 25 В, обратная полярность)

Длительность короткого замыкания каплями $t_{\text{кк}}$ — самый информативный и удобный из названных критериев, поскольку он:

- легко определяется при осциллографировании,
- хорошо коррелируется с массо-размерными критериями переноса,
- позволяет оперативно оценивать влияние параметров режима и характеристик источников на перенос,
- дает возможность прогнозировать вероятность прилипания электрода к ванне.

Поясним по отдельности названные достоинства данного критерия.

1) Длительность $t_{\text{кк}}$ измеряют по ширине провала на осциллографической записи сварочного напряжения $U_{\text{св}}$ (рис. 9.4), потому что в момент касания капель ванны напряжение скачком снижается почти до нуля. Масштаб записи по времени выбирают так, чтобы измерить $t_{\text{кк}}$ в интервале 2–30 мс с точностью не хуже 0,2 мс. При автоматической регистрации событие короткого замыкания идентифицируют по совпадению трех условий (например, $I > 20$ А, $U < 10$ В, $t > 1$ мс).

2) Связь длительности $t_{\text{кк}}$ с диаметром $d_{\text{к}}$ капли выясняли при синхронизации осциллографической записи с киносъёмкой, а также при искусственном выделении капель в воду для их измерения и подсчета [9]. Установлено прямое пропорциональное соотношение между названными критериями (рис. 9.5) в достаточно широком диапазоне технологических условий: несколько марок стальных электродов с рутиловым и основным покрытием диаметром 3–4 мм при токах 100–200 А.

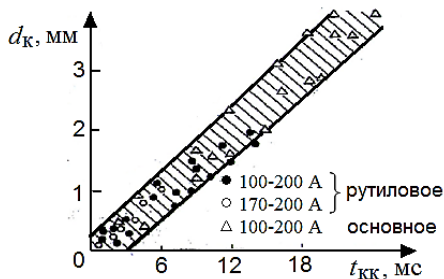


Рис. 9.5. Взаимосвязь между диаметром $d_{\text{к}}$ и длительностью $t_{\text{кк}}$ короткого замыкания капель при ручной сварке электродами с разными типами покрытия [9]

В этих экспериментах для средних значений $d_{\text{к}}$ и $t_{\text{кк}}$ при размерностях [мм] и [мс] получено уравнение регрессии первого порядка

$$d_{\text{к.ср}} = 0,18t_{\text{кк.ср}},$$

или, если отражать действительную физическую зависимость,

$$t_{\text{кк.ср}} = 5,5d_{\text{к.ср}}$$

Подобным образом связь массы капли $m_{\text{к}}$ [мг] с длительностью $t_{\text{кк}}$ [мс] выражается уравнениями

$$m_{\text{к.ср}} = 0,02t_{\text{кк.ср}}^3 \text{ или } t_{\text{кк.ср}} = 3,6 \cdot \sqrt[3]{m_{\text{к.ср}}}.$$

3) Влияние технологических и электротехнических приемов воздействия на перенос удобно оценивать на осциллограммах именно по длительности и частоте коротких замыканий каплями, поскольку известно, что величина $t_{\text{кк}}$:

— уменьшается с ростом тока и возрастает с увеличением диаметра электрода, т.е. зависит от плотности тока в электроде j_3 [А/мм²] (поэтому, например для электродов с основным покрытием справедливо приблизительное соотношение $t_{\text{кк}} = 120/j_3$);

— практически не зависит от напряжения, и только при очень низком $U_{\text{св}}$ и короткой дуге ($l_{\text{д}} < 0,5d_3$) резко уменьшается по причине ограничения роста капли длиной межэлектродного промежутка;

— на прямой полярности дуги несколько меньше, чем на обратной, но зато на прямой полярности больше разброс его значений (например, при сварке электродом с основным покрытием УОНИ 13/55 диаметром 4 мм с током 130 А на прямой полярности $t_{\text{кк.ср}} = 11,6$ мс, а $\sigma_{\text{ткк}} = 7,2$ мс, тогда как на обратной полярности $t_{\text{кк.ср}} = 12,8$ мс, но $\sigma_{\text{ткк}} = 5,0$ мс [9]),

— сильно зависит от типа электродного покрытия (для рутилового покрытия, характерного мелкокапельным переносом, типичные значения $t_{\text{кк}} = 2\text{--}12$ мс, тогда как для основного покрытия с крупными каплями $t_{\text{кк}} = 5\text{--}25$ мс, причем особенно сильно возрастает $t_{\text{кк}}$ с увеличением содержания в покрытии флюорита CaF_2 [9]).

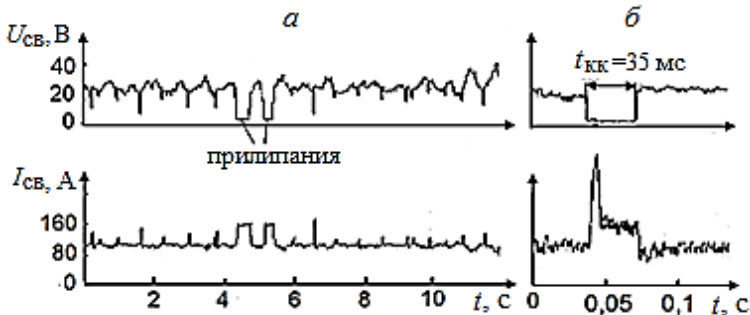


Рис. 9.6. Прилипание электрода к ванне при ручной сварке (ВДУ-306МТ, электрод УОНИ 13/55 Ø4 мм, 110 А, 23 В, обратная полярность, вертикальное положение, $t_{\text{кк.ср}} = 22,5$ мс)

4) Прилипание или «примержание» электрода к ванне легко обнаруживается на осциллограммах и адекватно характеризуется именно длительностью $t_{\text{кк}}$. На рис. 9.6, а зафиксировано два случая прилипания длительностью 0,4 и 0,3 с. В процессе такого короткого замыкания жидкая перемычка не перетекает в ванну, а наоборот, начинает застывать, что потребует от сварщика приложения значительных усилий для отрыва электрода от ванны. О вредном влиянии прилипания на устойчивость ранее уже упоминалось (см. разд. 4.6), поэтому здесь более подробно анализируем только условия их появления и способы предупреждения.

В работе [41] описан массовый эксперимент по сварке электродами с основным покрытием с измерением $t_{\text{кк}}$ и фиксированием случаев прилипания (рис. 9.7). Поскольку явление прилипания носит случайный характер и происходит при совпадении нескольких неблагоприятных факторов, то граница зон наличия и отсутствия прилипания выглядит размытой.

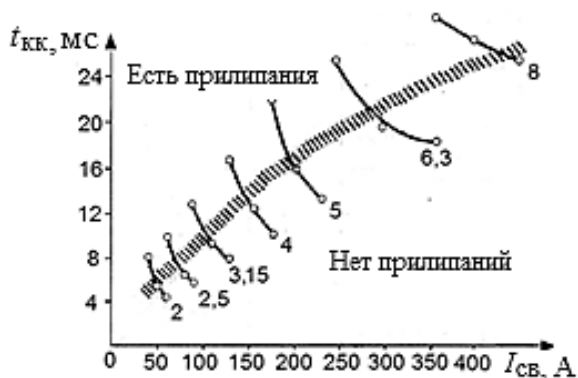


Рис. 9.7. Зависимость фактической и допустимой длительности короткого замыкания каплями $t_{\text{кк}}$ от тока $I_{\text{св}}$ при ручной сварке покрытыми электродами диаметром 2–8 мм [41]

Например, для электрода диаметром 4 мм склонность к прилипанию возникает при токе $I_{\text{св}} < 140$ А, при котором $t_{\text{кк.ср}} > 13$ мс. Длительность прилипания на 1–2 порядка больше средней длительности короткого замыкания каплями в этом же эксперименте, но значение $t_{\text{кк.ср}}$ может служить сигналом о приближении к зоне режимов с высокой вероятностью прилипания. С учетом этого в зависимости от диаметра d ,

[мм] по данным рис. 9.7 $t_{\text{кк.ср}}$ [мс] следует ограничивать сверху значением

$$t_{\text{кк.ср}} < 3d_3.$$

Разумеется, важно оговорить технологические условия предупреждения прилипания. Очевидно, таким условием является ограничение снизу величины тока короткого замыкания, не дающего застыть жидкой перемычке между электродом и ванной. Используя приведенные на рис. 9.7, а также собственные данные, получаем соотношение для допустимой плотности тока короткого замыкания в электроде, соответствующей предупреждению прилипания — $j_{\text{кз}} > 20 \text{ А/мм}^2$.

Частота $f_{\text{кк}}$ коротких замыканий каплями и обратная величина — *интервал следования коротких замыканий $T_{\text{кк}}$* — менее распространенные непосредственные критерии переноса с технологическими короткими замыканиями. Но именно они вместе со статистическими характеристиками ($f_{\text{кк.ср}}$ и $\sigma_{f_{\text{кк}}}$) дают представление о регулярности переноса и размерах капель. Правда, размер $d_{\text{к}}$ лучше увязывать с другим критерием переноса, также определяемым по осциллограммам — *длительностью интервалов горения дуги $t_{\text{д}}$ между короткими замыканиями*. Очевидна связь между названными критериями

$$T_{\text{кк}} = t_{\text{д}} + t_{\text{кк}} = 1/f_{\text{кк}}.$$

Определение частоты переноса по частоте коротких замыканий на осциллограммах может привести к двум систематическим ошибкам.

1) Не каждое короткое замыкание, зафиксированное на осциллограмме, завершается переносом капли. Довольно часто после соприкосновения с ванной капля отбрасывается электродинамической силой и остается на электроде. Это дало основание для введения понятий действительных и случайных коротких замыканий [9, 161]. В практике обработки осциллограмм при сварке покрытыми электродами замыкания длительностью $t_{\text{кк}} < 1 \text{ мс}$ считаются случайными и не учитываются при определении частоты $f_{\text{кк}}$.

2) Не каждый перенос сопровождается коротким замыканием, поэтому часть переносов не фиксируется на осциллограмме. Хорошее выявление переносов по осциллограммам обеспечивается при сварке электродами с основным покрытием при плотности тока $j_3 < 13 \text{ А/мм}^2$ и напряжении $U_{\text{св}} < 26 \text{ В}$.

Пиковый ток коротких замыканий каплями $I_{\text{кп}}$ — непосредственный критерий, специфичный именно для процесса переноса с технологическими короткими замыканиями (см. рис. 9.4). Он характеризует интенсивность разрушения жидкой перемычки между электродом и каплей действием электродинамической силы. Поэтому он существенно влияет как на устойчивость процесса, так и на разбрызгивание электродного ме-

талла. Покажем основные зависимости пикового тока от характеристик источника и сварочной цепи:

- ток $I_{\text{кп}}$ прямо зависит от установившегося тока короткого замыкания источника $I_{\text{к}}$, и поэтому увеличивается с ростом напряжения холостого хода $U_{\text{х}}$ и со снижением внутреннего сопротивления источника $Z_{\text{и}}$;

- при сварке тонкими электродами $I_{\text{кп}}$ существенно ограничивается сопротивлением внешней сварочной цепи $R_{\text{вн}}$, в частности сопротивлением вылета электрода, достигающим 0,1 Ом и сопротивлением капли — до 0,03 Ом;

- введение индуктивности в сварочную цепь диодных выпрямителей для снижения тока $I_{\text{кп}}$ оправдано только на низких режимах (например, использование дросселя с индуктивностью 0,15–0,5 мГн в диапазоне сварочных токов 60–100 А позволило снизить отношение $I_{\text{кп}}/I_{\text{св}}$ с 1,6 до 1–1,3 [24]);

- в диодных выпрямителях органически присущие им небольшие пульсации напряжения существенно повышают ток $I_{\text{кп}}$ — при увеличении коэффициента пульсации $\beta_{\text{св}}$ с 0,20–0,24 до 0,32–0,40 отношение $I_{\text{кп}}/I_{\text{св}}$ увеличилось с 1,4–1,6 до 1,8–2,0 [24] (хорошо сглажен ток у трехфазной мостовой схемы и у шестифазной схемы с уравнительным дросселем — $\beta_{\text{св}} < 0,24$; чрезмерно пульсирует ток у трехфазной однополупериодной схемы — $\beta_{\text{св}} = 0,40$);

- в тиристорных выпрямителях пиковый ток $I_{\text{кп}}$ в несколько раз превышает сварочный $I_{\text{св}}$ даже при допустимом по требованиям обеспечения устойчивости коэффициенте пульсации $\beta_{\text{св}} = 0,5$ (приемы сглаживания сварочного тока, принимаемые для обеспечения устойчивости, положительно влияют и на $I_{\text{кп}}$, снижая его — это ограничение глубины фазового регулирования, отказ от несимметричных схем выпрямления, использование мощного дросселя на 0,5–1 мГн и высоковольтной подпитки на 20–30 А).

Пример оценки источников по критериям переноса при сварке с технологическими короткими замыканиями приведен в табл. 9.2. Эксперимент выполнялся на нескольких конвенциональных и современных источниках в широком диапазоне режимов от 60 до 300 А. На рис. 9.8 приведены осциллограммы, по которым определялись непосредственные критерии переноса. Левые части осциллограмм записаны в масштабе 250 мс/дел. С их помощью удобно подсчитать частоту коротких замыканий $f_{\text{кк}}$. Правые части записаны в масштабе 25 мс/дел. С их помощью определяется $t_{\text{кк}}$. Измерения пикового тока лучше выполнять на осциллограмме с малым масштабом временной развертки, — здесь на правых частях с масштабом 25 мс/дел, где кривая тока не искажается фильтром осциллографа.

По данным табл. 9.2 на примере транзисторного постового регулятора ЧПР-315 поясним принципы анализа переноса по значениям критериев. Средние значения длительности $t_{\text{кк.ср}}$ при сварке электродами с рутиловым покрытием

тием (ОЗС-12) и близким к нему по свойствам ильменитовым покрытием (ОЗС-4) укладываются в диапазон 1,8–4,0 мс. Это вполне соответствует экспериментальным данным других исследователей [9]. С помощью формулы $d_{к.ср} = 0,18 t_{кк.ср}$ переведем эти цифры в соответствующий диапазон размера каплей — диаметр 0,3–0,7 мм. Это позволяет квалифицировать перенос как смешанный — мелкокапельный с технологическими короткими замыканиями — соответствующий справочным характеристикам этих электродов.

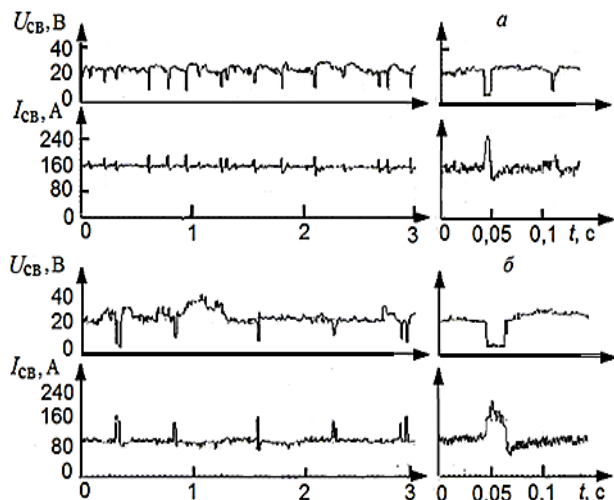


Рис. 9.8. Оценка переноса при ручной сварке: а — нижнее положение, 150 А, 23 В, $f_{кк.ср} = 4,7$ Гц, $t_{кк.ср} = 9,0$ мс, $I_{кл.ср} = 216$ А; б — вертикальное положение, 110 А, 25 В, $f_{кк.ср} = 1,7$ Гц, $t_{кк.ср} = 22,5$ мс, $I_{кл.ср} = 170$ А (ВДУ-306МТ, УОНИ 13/55 Ø4 мм, обратная полярность)

Подобным образом для электродов с основным покрытием (УОНИ 13/55, LB 52U, ОК 53.70) диапазон длительностей $t_{кк.ср} = 6,2$ –12,0 мс, а диапазон размеров каплей $d_{к.ср} = 1,1$ –2,2 мм, что для разных электродов составляет $(0,35$ – $0,55)d_э$. Это смешанный мелко- или крупнокапельный перенос с короткими замыканиями, но также типичный для электродов с основным покрытием [9, 24, 160]. Разброс значений длительности характеризуется для этих электродов коэффициентом вариации $k_{vткк} = 0,18$ – $0,26$, что позволяет считать капли близкими по размеру. Иначе оценивается перенос при сварке электродами с целлюлозным покрытием Fox Cel. При относительно небольших средних значениях $t_{кк.ср}$ и $d_{к.ср}$ их разброс довольно велик — $k_{vткк} = 0,28$ – $0,38$. Но и этот недостаток следует отнести к особенностям плавления электродного покрытия с большим количеством органических веществ при большой длине дуги и значительных ее колебаниях.

Теперь оценим эти же результаты с позиций вероятности прилипания электрода к ванне. При сварке электродом ОК 53.70 диаметром 4 мм на токе 150 А обнаружена самая большая длительность $t_{кк.ср} = 12$ мс. Поскольку по дан-

ным работы [41] (см. рис. 9.7) для данного электрода $t_{\text{кк.ср}}$ должна быть менее 13 мс, можно считать вероятность прилипания невысокой.

Таблица 9.2.
Непосредственные критерии переноса электродного металла при
ручной сварке с технологическими короткими замыканиями
(постоянный ток, нижнее положение)

Источник		Диодный выпрямитель ВД-306Э			Тиристорный выпрямитель ВДУ-306МТ			Агрегат АДБ-4004, генератор ГД-4006-09	
Диаметр электрода, мм		3	4	6	2,5	4	6	3	4
Марка электрода		УОНИ 13/55		ОЗС -4	УОНИ 13/55		ОЗС -4	УОНИ 13/55	
Сварочный ток, А (нормальный)		100	150	300	80	150	300	100	150
Полярность дуги		обратная							
Длитель- ность коротких замыканий (КЗ) кап- лями	$t_{\text{кк.ср}}$ мс	—	—	—	4,4	9,0	17	4,9	8,0
	$\sigma_{\text{фкк}}$, мс	—	—	—	1,8	4,0	5,7	2,6	1,8
	$k_{\text{уфкк}}$	—	—	—	0,41	0,44	0,31	0,53	0,22
Частота КЗ капля- ми	$f_{\text{кк.ср}}$ Гц	2,8	1,8	0,9	10	4,7	2,0	4,0	5,3
	$\sigma_{\text{фкк}}$, Гц	—	—	—	1,8	0,8	1,2	0,8	2,3
	$k_{\text{уфкк}}$	—	—	—	0,18	0,17	0,60	0,20	0,43
Пиковый ток КЗ каплями	$I_{\text{кп.ср}}$ А	—	—	—	158	216	326	135	175
	$\sigma_{\text{фкп}}$ А	—	—	—	8	27	6	6	6
	$k_{\text{уфкп}}$	—	—	—	0,05	0,12	0,02	0,04	0,03
Коэффициент потерь на угар и разбрызгивание $k_{\text{р}}$, %		2,4 [163]	—	1,5 [24]	2,2	0,8	3,9	—	—

Таблица 9.2. (продолжение)

*Непосредственные критерии переноса электродного металла при
ручной сварке с технологическими короткими замыканиями
(постоянный ток, нижнее положение)*

Источник		Транзисторный постовый регулятор ЧПР-315 с многопостовым выпрямителем ВДМ-1201							
Диаметр электрода, мм		2	3,2	4	6	3,2	4	3,2	4
Марка электрода		ОЗС -12	LB 52U	OK 53.70	ОЗС -4	Fox Cel			
Сварочный ток, А (нормальный)		60	110	150	300	110	150	110	150
Полярность дуги		обратная						прямая	
Длительность коротких замыканий (КЗ) каплями	$t_{\text{кк.ср}}$ мс	1,8	6,2	12	4,0	3,7	4,5	3,0	2,6
	$\sigma_{\text{кк}}$ мс	0,4	1,1	3,1	1,0	1,4	1,3	1,1	0,9
	$k_{\text{в/кк}}$	0,2	0,18	0,26	0,25	0,38	0,28	0,37	0,35
Частота КЗ каплями	$f_{\text{кк.ср}}$ Гц	5,0	7,0	2,9	0,5	12,7	9,2	2,5	1,5
	$\sigma_{\text{кк}}$ Гц	1,0	1,0	0,5	0,3	2,1	3,0	1,3	0,6
	$k_{\text{в/кк}}$	0,2	0,14	0,17	0,60	0,16	0,32	0,52	0,44
Ток форсирования при КЗ каплями	$I_{\text{ф.ср}}$ А	88	125	182	300	126	186	133	180
	$\sigma_{I_{\text{ф}}}$ А	9	9	6	0	6	6	8	7
	$k_{\text{в/I}_{\text{ф}}}$	0,1	0,07	0,04	0	0,05	0,03	0,06	0,04

Частота коротких замыканий у этого же источника (ЧПР-315+ВДМ-1201) для электродов с рутиловым и основным покрытием $f_{\text{кк.ср}} = 2,9\text{--}7$ Гц, что вполне типично для таких электродов. В этот диапазон не включено значение $f_{\text{кк.ср}} = 0,5$ Гц для электрода ОЗС-4 диаметром 6 мм, поскольку на используемом режиме (300 А, 31 В) перенос лишь иногда завершается короткими замыканиями и на осциллограммах отражается редко. При сварке электродами с целлюлозным покрытием характер переноса сильно зависит от полярности дуги. При обратной полярности дуга сравнительно короткая, а капли — разного размера, поэтому частота переноса с короткими замыканиями довольно велика — $f_{\text{кк.ср}} = 9,2\text{--}12,7$ Гц. Иное дело при прямой полярности. Здесь мощный газовый поток от электрода к ванне сильно удлиняет дугу, поэтому на осциллограммах фиксирует

лишь часть переносимых капель, и частота коротких замыканий невысока — $f_{\text{кк.ср}} = 1,5\text{--}2,5$ Гц.

Ток короткого замыкания у этого же источника настраивается отдельно от сварочного и в процессе короткого замыкания каплями поддерживается автоматически (см. разд. 9.4). Поскольку перенос выполняется действием этого тока, то процесс следует характеризовать именно этим током форсирования $I_{\text{ф}}$, а не естественно развивающимся пиковым значением $I_{\text{кп}}$ (см. правые части рис. 9.8 и 9.14). Как следует из данных табл. 9.2, МП-система управления транзисторного регулятора ЧПР-315 очень точно воспроизводит настроенное значение тока форсирования $I_{\text{ф}}$ в любой момент сварки — коэффициент вариации импульсов тока короткого замыкания $k_{\text{н/ф}}$ не превышает 0,10.

Пример сопоставления конвенционального и инверторного источников по критериям переноса приведен в работе [224]. Конвенциональный источник ВД-306Э имеет криволинейную падающую характеристику, подобную приведенной на рис. 4.25, с наклоном около -1 В/А и током короткого замыкания $I_{\text{к}} = 135$ А при настроенном режиме 90 А, 23 В. Инверторный источник ВД-306 имеет комбинированную внешнюю характеристику, подобную рис. 4.26, с наклоном 3 (рабочего) участка -10 В/А и током форсирования 125 А на 4 участке при том же настроенном сварочном режиме. Выполнялась наплавка в нижнем положении электродами трех марок с основным покрытием. У таких электродов перенос осуществляется крупными каплями, в данном случае с технологическими короткими замыканиями.

По результатам осциллографирования сварочного тока и напряжения производились вычисление и статистическая обработка непосредственных критериев переноса $t_{\text{кк}}$, $f_{\text{кк}}$ и $I_{\text{кп}}$ (табл. 9.3). Из данных таблицы следует, что при прочих одинаковых условиях у инверторного источника в сравнении с конвенциональным:

- длительность коротких замыканий каплями $t_{\text{кк}}$ у разных электродов на 5–38 % ниже,
- частота коротких замыканий $f_{\text{кк}}$ на 11–78 % выше,
- пиковое значение тока короткого замыкания каплями $I_{\text{кп}}$ стабильней, а скорость его нарастания выше.

Более высокая динамичность электрических переходных процессов у инверторного источника при переносе объясняется быстроедействием высокочастотного транзисторного преобразователя, а также чрезвычайно малой индуктивностью сварочной цепи. Высокой регулярности переноса у инверторного источника помогает стабилизация тока (и скорости плавления электрода) на 3, почти вертикальном, участке ВАХ, и особенно наличие функции форсирования дуги. В свою очередь, высокая скорость переходных процессов способствует уменьшению размеров переносимых капель, снижению температуры сварочной ванны и сужению зоны термического влияния, а на этой основе повышению прочности и пластичности металла шва и сварного соединения в целом.

Таблица 9.3

Сопоставление источников по непосредственным критериям переноса

Источник		Диодный выпрямитель ВД-306Э			Инверторный источник ВД-306		
Диаметр электрода, мм		3,2					
Марка электрода		LB52U	УОНИ 13/55	ЦЛ-11	LB52U	УОНИ 13/55	ЦЛ-11
Сварочный ток, А		89	88	86	89	88	86
Полярность дуги		обратная					
Длительность коротких замыканий (КЗ) каплями	$t_{\text{кк, ср}}$ мс	6,7	6,3	12	5,4	6,0	8,7
	$\sigma_{\text{кк}}$, мс	1,85	2,544	3,76	1,36	1,90	2,52
	$k_{\text{у/кк}}$	0,28	0,40	0,31	0,25	0,32	0,29
Частота КЗ каплями	$f_{\text{кк, ср}}$ Гц	5,6	6,0	4,0	6,8	6,7	7,1
	$\sigma_{\text{кк}}$, Гц	1,3	1,9	1,1	1,3	1,4	1,7
	$k_{\text{у/кк}}$	0,23	0,32	0,28	0,19	0,21	0,24
Пиковый ток КЗ каплями	$I_{\text{кп, ср}}$ А	132	131	131	123	123	123
	$\sigma_{\text{кп}}$ А	6	5	5	0	0	0
	$k_{\text{у/кп}}$	0,05	0,04	0,04	0	0	0
Скорость нарастания dlk/dt , кА/с		7,1	8,1	8,3	10,3	12,3	11,2

Пример оценки по критериям переноса источника переменного тока — трансформатора СТШ-500-80 — при сварке с технологическими короткими замыканиями приведен в работе [9]. Короткие замыкания каплями проявляются на осциллограмме сварочного напряжения провалами почти до нуля (рис. 9.9). Большинство коротких замыканий начинается при смене полярности, а заканчивается в середине этого же полупериода.

Такая синхронность начала переносов объясняется следующим образом. При снижении синусоиды тока до нуля исчезает электродинамическая сила вблизи активного (катодного или анодного) пятна, и резко снижается реактивная сила паров, поддерживающие каплю на электроде, поэтому она смещается к ванне. К тому же снижается давление дуги на ванну, и она подтекает под электрод. При достаточном размере капли такое взаимное сближение ее с ванной может привести к технологическому короткому замыканию. Особенно четко

проявляются описанные процессы при переходе от прямой полярности к обратной. Дело в том, что в полупериоде прямой полярности капля поджимается к электроду сильней, и следовательно при исчезновении дуги опускается резче. Поэтому более 70 % переносов начинаются именно в этот момент (рис. 9.9, б)

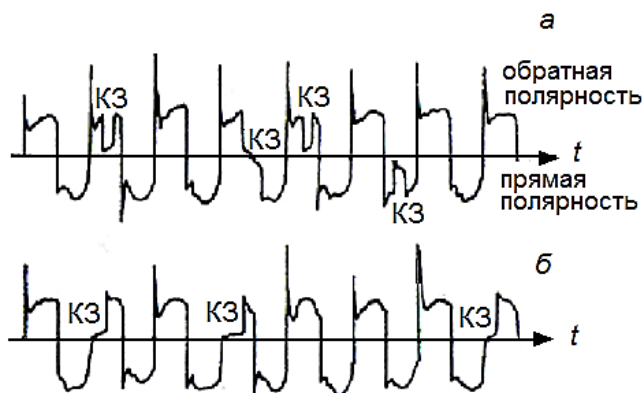


Рис. 9.9. Осциллограммы сварочного напряжения при ручной сварке на переменном токе: а — 140 А, б — 170 А (трансформатор СТШ-500-80, электрод УОНИ 13/45 Ø4 мм)

Синхронное окончание переносов также имеет физическое объяснение. К середине полупериода ток короткого замыкания капель, возрастаая по синусоиде, достигает максимума. При этом максимальна и электродинамическая сила, действующая в жидкой перемычке между каплей и электродом, что повышает вероятность переноса капли именно вблизи середины полупериода. Поэтому при частоте 50 Гц наиболее вероятная длительность переноса $t_{\text{кк.ср}} = 5$ мс.

Более подробные данные о распределении плотности вероятности $t_{\text{кк}}$ дают гистограммы (рис. 9.10).

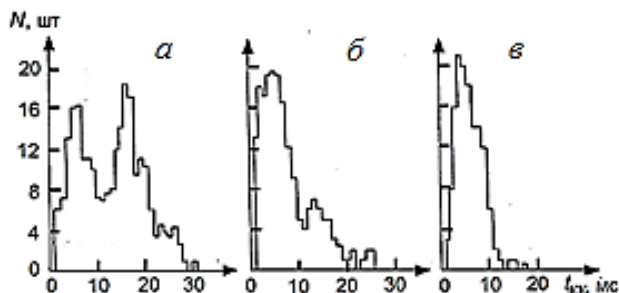


Рис. 9.10. Гистограммы длительности $t_{\text{кк}}$ при ручной сварке на переменном токе: а — 130 А, $t_{\text{кк.ср}} = 11,5$ мс, $\sigma_{\text{ткк}} = 7,4$ мс; б — 170 А, $t_{\text{кк.ср}} = 7,8$ мс, $\sigma_{\text{ткк}} = 4,2$ мс; в — 200 А, $t_{\text{кк.ср}} = 6,1$ мс, $\sigma_{\text{ткк}} = 2,9$ мс; (трансформатор СТШ-500-80, $U_x = 80$ В, электрод УОНИ 13/45 Ø4 мм)

При сварке на низких режимах график имеет три моды (максимума случайной величины $t_{\text{кк}}$) с координатами 5, 15 и 25 мс (рис. 9.10, а). Из него следует, что при низких режимах только часть переносов заканчивается приблизительно за 5 мс (1 мода). Если до этого времени короткое замыкание не привело к отделению капли, то следующий благоприятный момент наступит только в следующем максимуме синусоиды тока короткого замыкания (2 мода) или через полный период (3 мода). С увеличением настроенного сварочного тока среднее значение $t_{\text{кк.ср}}$ уменьшается за счет сокращения доли 3 и 2 мод (рис. 9.10, б), а при самом большом токе благодаря их полному исчезновению (рис. 9.10, в).

9.2.3. Характеристики разбрызгивания электродного металла

Коэффициент потерь на угар и разбрызгивание электродного металла k_p — самый распространенный непосредственный критерий результата переноса. Его определяют как отношение масс использованного и израсходованного металла электродного стержня по формуле

$$k_p = \frac{M_p - M_n}{M_p} \cdot 100 \% \quad (9.1)$$

где M_p и M_n — массы расплавленного и наплавленного металла, г.

В этом эксперименте массу наплавленного металла определяют по результатам взвешивания наплавляемой пластины: первый раз до наплавки, а второй — после наплавки и удаления брызг. Пластину взвешивают с точностью не хуже 100 мг. А масса расплавленного металла определяется расчетно-экспериментальным методом. Для этого измеряют длину металлического стержня электрода: первый раз до наплавки, а второй — после нее, с точностью не хуже 0,5 мм. А затем вычисляют массу израсходованного отрезка стержня длиной Δl_3 с учетом плотности металла γ по формуле

$$M_p = \gamma \Delta l_3 (\pi d_3^2 / 4).$$

Условия и режимы сварки — по ГОСТ 25616-83 (см. Введение).

Коэффициент разбрызгивания ψ_p — другой непосредственный критерий переноса. Его определяют по формуле

$$\psi_p = \frac{M_6}{M_p} 100 \%. \quad (9.2)$$

Для определения массы брызг M_6 наплавку выполняют на пластину, размещенную внутри медной коробки для улавливания брызг. По окончании наплавки собирают брызги с поверхности наплавленной пластины, а также с внутренних стенок коробки-ловушки, очищают брызги от шлака, магнитом собирают металлическую часть брызг, при необходимости разделяют по фракциям с помощью набора сит и, наконец, взвешивают на аналитических весах с точностью не хуже 5 мг. В целом методика определения коэффициента разбрызгивания ψ_p довольно трудоемка и поэтому используется сравнительно редко.

По рис. 9.11 поясним связь коэффициентов k_p и ψ_p друг с другом. Видно, что коэффициент потерь больше коэффициента разбрызгивания — частично из-за потерь на угар. Особенно значительна разница между k_p и ψ_p при сварке на высоких режимах — до 60 % от общей массы потерь (рис. 9.11, б). С увеличением тока увеличиваются потери на угар, но особенно значительно — на разбрызгивание. Как и при сварке проволочным электродом (см. разд. 8.2.3) это объясняется доминированием электродинамической силы в начале и конце короткого замыкания каплей. Ведь известно, что эта сила пропорциональна квадрату силы тока.

Выясним также зависимость обоих критериев от типа электродного покрытия. На рис. 9.11, а видно, что при сварке электродами УОНИ 13/55 с основным покрытием разбрызгивается от 1 до 8 % электродного металла, причем большая часть брызг (до 70 % по массе) переносится крупными каплями с $d_k > 1,6$ мм. А это существенно затрудняет очистку сварного соединения, поскольку крупные капли прочней привариваются к поверхности изделия. На рис. 9.11, б отметим, что при использовании электродов МР-3 с рутиловым покрытием ниже как общая масса разбрызгиваемого металла, так и доля в ней крупных капель.

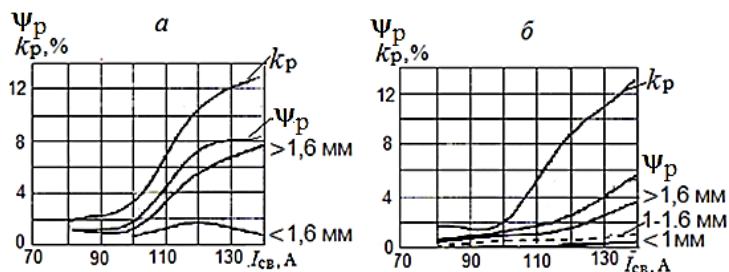


Рис. 9.11. Оценка потерь электродного металла при сварке электродами УОНИ 13/55 (а) и МР-3 (б) взвешиванием брызг (ψ_p) и взвешиванием пластины (k_p) (выпрямитель ВД-306, электрод $\varnothing 3$ мм, обратная полярность) [162]

Коэффициент *набрызгивания* представляет собой отношение массы приварившихся к изделию капель и массы расплавленного электродного металла, и поэтому может служить характеристикой трудоемкости послесварочной очистки сварного соединения от брызг. Набрызгивание зависит от состояния поверхности изделия и от типа электродного покрытия, точнее — от диаметра переносимых капель. А в остальном коэффициент набрызгивания повторяет зависимости от режима, ранее показанные для коэффициента разбрызгивания [9, 162, 163]. Он к тому же довольно трудоемок в определении, и следовательно не перспективен в качестве критерия оценки источников.

Влияние типа источника на потери исследовалось в работе [54]. При сравнении конвенциональных источников, различных по принципу действия (преобразователь ПСО-300 с коллекторным генератором, тиристорный выпрямитель ВДУ-504, трансформатор СТШ-500-80 с магнитным шунтом и трансформатор Разряд-250 с ИСГД) не обнаружено разницы в значениях k_p , достаточной для выделения которого-либо из них по показателю потерь электродного металла (табл. 9.4). Однако очевидно, что специфические для каждого типа технические усовершенствования могут привести к существенному снижению разбрызгивания. Так, в группе вращающихся машин вместо коллекторных генераторов широко применяются вентильные. У них из-за повышенной частоты преобразования 200–1000 Гц быстродействие повышается на порядок в сравнении с коллекторными. Благодаря этому существенно снижается ток короткого замыкания к моменту отделения капли от электрода, а поэтому понижается и разбрызгивание — на разных режимах в 1,4–4 раза [164]. В группе тиристорных выпрямителей внедрение МП-регуляторов значительно улучшило характеристики переноса, как за счет формирования комбинированных внешних характеристик, так и благодаря внедрению функции форсирования дуги (см. табл. 9.2).

Таблица 9.4.

*Потери электродного металла
у различных типов конвенциональных источников [54]*

Электрод			Режим		Коэффициент потерь на угар и разбрызгивание k_p , %			
марка	диаметр, мм	покрытие	ток, А	напряжение, В	ПСО-300	ВДУ-504	СТШ-500-80	Разряд-250
УОНИ 13/55	5	основное	160–170	25	6,2	2,2	–	1,0–4,4
МР-3	5	рутиловое	190	23	11,8	12,7	9,3–12,2	9,6–10,5
АНО-4	5		195		–	–	15,7	15,1
	3		95		–	–	9,9	9,6

Полезно также сопоставить по критерию k_p современные и конвенциональные источники. В работе [163] показано, что у инверторного источника Форсаж-315 в широком диапазоне токов и марок электродов коэффициент потерь на 0,5–2 % ниже, чем у диодного выпрямителя ВД-306. Видимо, это объясняется независимой настройкой тока короткого замыкания у инверторного источника благодаря более совершенной системе управления.

Пример оценки разбрызгивания был выполнен в массовом испытании нескольких диодных выпрямительных схем [24]. В качестве критериев оценки приняты коэффициент потерь k_p и пиковый ток $I_{кп}$, точнее кратность этого тока по отношению к сварочному $I_{кп}/I_{св}$. В эксперименте варьировались значения наклона внешней характеристики источника, коэффициента пульсации сварочного тока $\beta_{I_{св}}$, а также индуктивности $L_{др}$ сглаживающего дросселя (табл. 9.5). Наклон здесь характеризуется отношением установившегося тока короткого замыкания к сварочному $I_{кз}/I_{св} = 1,1-1,98$, что соответствует изменению r_i от $-3,5$ до $-0,08$ В/А. Разные значения коэффициента пульсации $\beta_{I_{св}}$ получались из-за использования разных схем выпрямления, а также благодаря включению в сварочную цепь дросселя. Применялись электроды УОНИ 13/45 диаметром от 2 до 6 мм при настроенном токе $I_{св}$ от 60 до 300 А.

Таблица 9.5.

Непосредственные и косвенные критерии переноса при ручной сварке (диодные выпрямители, электрод УОНИ 13/45, обратная полярность)

Схема выпрямления	$\beta_{I_{св}}$	$d_3=2$ мм, $I_{св}=60$ А, $U_{св}=21$ В				$d_3=6$ мм, $I_{св}=300$ А, $U_{св}=25$ В			
		k_p , % *	Ток короткого замыкания			k_p , %	Ток короткого замыкания		
			$I_{кп}/I_{св}$	$I_{кз}/I_{св}$	$I_{н-к}/I_{св}$		$I_{кп}/I_{св}$	$I_{кз}/I_{св}$	$I_{н-к}/I_{св}$
трехфазная мостовая	0,24	-13,8	1,63	1,1	1,75	1,7	1,39	1,17	1,65 1,35**
трехфазная мостовая + $L_{др} = 0,15$ мГн	0,20	-12,4	1,07	1,15	—	1,2	1,37	1,19	—
трехфазная мостовая + $L_{др} = 0,5$ мГн	0,18	-12,3	0,95	1,19	—	1,4	1,41	1,26	—
четырёхфазная	0,32	-12,9	1,61	1,13	—	1,9	1,5	1,24	—
шестифазная с уравнительным дросселем	0,20	-13,5	1,62	1,14	—	1,1	1,44	1,17	—
шестифазная нулевая	0,20	-14,2	1,68	1,34	—	4,5	1,72	1,47	—
трехфазная однополупериодная	0,40	— 15,0	1,8 4	1,68	—	6,4	1,97	1,98	—

* минус при k_p означает, что масса наплавленного металла больше, чем расплавленного, из-за перехода в шов металлических компонентов покрытия

** с ограничением учитываемой длительности короткого замыкания типичными значениями $t_{кз}$ по рис. 9.13, б

Наиболее типично проявляются основные закономерности разбрызгивания при сварке толстым электродом диаметром 6 мм, поэтому начнем оценку критериев с правой части табл. 9.5. Здесь отмечается естественная прямая зависимость коэффициента потерь k_p от пикового тока $I_{кп}$ (см. также рис. 9.12, а). Видно, что при малых значениях $I_{кп}/I_{св} = 1,37\text{--}1,53$ разбрызгивание невелико и почти постоянно — $k_p = 1,1\text{--}1,9\%$. Но при дальнейшем увеличении кратности пикового тока $I_{кп}/I_{св}$ до 1,97 потери на угар и разбрызгивание достигают высокого уровня 6,4 %, видимо, из-за чрезмерного действия на каплю электродинамической силы. Установленная здесь прямая связь между непосредственными критериями переноса k_p и $I_{кп}$ подтверждается и на других режимах, кроме самых низких (60–100 А).

При сварке тонким электродом диаметром 3 мм (рис. 9.12, б) потери, наоборот, возрастают при уменьшении $I_{кп}$. Авторы работы [24] считают, что сварка на малых токах затруднена из-за частых прилипаний электрода к ванне, которые вынуждают сварщика работать с длинной дугой, что существенно ухудшает перенос. Поэтому более высокие значения пикового тока $I_{кп}$, получаемые в схемах с большим $\beta_{св}$ и предотвращающие прилипания, способствуют и снижению потерь.

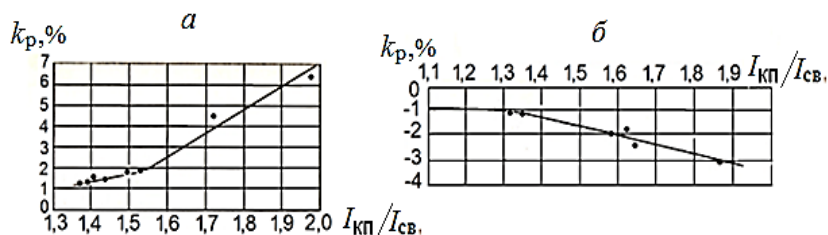


Рис. 9.12. Зависимость коэффициента потерь k_p от пикового тока короткого замыкания $I_{кп}$: а — электрод $\varnothing 6$ мм, $I_{св} = 300$ А; б — электрод $\varnothing 3$ мм, $I_{св} = 100$ А (диодные выпрямители, УОНИ 13/45, обратная полярность)

Отметим также некоторые зависимости непосредственных критериев от электрических характеристик источника и для других диапазонов токов (100–250 А) и других электродов (диаметром 3–5 мм), не отраженных в табл. 9.5. Пульсации сварочного тока оказывают вредное влияние на k_p и $I_{кп}$ только при $\beta_{св} > 0,30$. Введение дросселя несколько снижает $I_{кп}$. Но в схемах с хорошим сглаживанием (трехфазная мостовая и четырехфазная несимметричная) и при используемых здесь индуктивностях (0,15 и 0,5 мГн) дроссель на разбрызгивание практически не влияет.

9.3. Косвенные критерии переноса при ручной сварке

Математическое описание процесса переноса с технологическими короткими замыканиями ограничим только анализом стадии короткого замыкания, ответственной за разбрызгивание и прилипания. Сначала

рассмотрим более простой случай работы конвенционального источника с напряжением холостого хода U_x , внутренним сопротивлением $R_{\text{и}}$ и индуктивностью L в коротко замкнутой сварочной цепи. Ток $I_{\text{к}}$ от предшествующей дуговой стадии с током $I_{\text{д}}$ нарастает сначала быстро, а затем все медленней, и к концу стадии короткого замыкания длительно-стью $t_{\text{кк}}$ достигнет пикового значения $I_{\text{кп}}$ (см. рис. 4.17):

$$I_{\text{кп}} = \left(\frac{U_x}{R_{\text{и}}} - I_{\text{д}} \right) \left(1 - e^{-\frac{R_{\text{и}}}{L} t_{\text{кк}}} \right) + I_{\text{д}}. \quad (9.3)$$

Если короткое замыкание затянется, то при $t_{\text{кк}} > 3L/R_{\text{и}}$ ток достигнет установившегося значения

$$I_{\text{ку}} = \frac{U_x}{R_{\text{и}}}. \quad (9.4)$$

Для более общего случая с учетом и активного $R_{\text{и}}$ и индуктивного $X_{\text{и}}$ сопротивлений источника, а также внешнего сопротивления сварочной цепи $R_{\text{вн}}$, в котором преобладает сопротивление вылета электрода

$$I_{\text{ку}} = \frac{U_x}{\sqrt{(R_{\text{и}} + R_{\text{вн}})^2 + X_{\text{и}}^2}} \quad (9.5)$$

На основе этих уравнений поясним выбор косвенных критериев для оценки переноса, а также зависимости этих критериев от параметров источника и сварочной цепи.

Установившийся ток короткого замыкания источника $I_{\text{ку}}$ — удобный косвенный критерий оценки переноса при сварке с технологическими короткими замыканиями. Диапазон настройки $I_{\text{ку}}$ для предупреждения негативных последствий переноса — разбрызгивания и прилипания — для конкретных условий сварки можно установить в технологическом эксперименте. Так, для конвенциональных источников при использовании электродов с основным покрытием диаметром 3 мм можно рекомендовать $I_{\text{ку}} = 125\text{--}130$ А. Действительно, для предотвращения прилипания электрода к ванне здесь необходимо обеспечить ток $I_{\text{ку}} > 125$ А, а для ограничения потерь на угар и разбрызгивание величиной $k_{\text{р}} = 5\%$ допустимое значение тока $I_{\text{ку}} < 130$ А.

Ток $I_{\text{ку}}$ определяется при снятии внешней характеристики или может быть заимствован из технической документации источника. В соответствии с уравнениями (9.4 и 9.5) ток $I_{\text{ку}}$ увеличивается при увеличении напряжения холостого хода источника U_x и уменьшении наклона его внешней характеристики $|\rho_{\text{и}}|$ (при уменьшении $R_{\text{и}}$ и $X_{\text{и}}$). Но с помощью этих же параметров настраивается и сварочный ток. Поэтому в конвенциональном источнике эти параметры принимают на основе компромисса между $I_{\text{ку}}$ и $I_{\text{св}}$, не достигая оптимума ни по тому, ни по другому.

Иное дело, современный источник с низковольтной подпиткой, у которого ток $I_{\text{кз}} = I_{\text{к4}}$ настраивается отдельным регулятором тока короткого замыкания (см. рис. 4.24, участок 4 ВАХ).

Достоинством критерия $I_{\text{кз}}$ является четкая физическая связь с непосредственным критерием — пиковым током короткого замыкания каплей $I_{\text{кп}}$ — отражаемая уравнением (9.3). Тем не менее, не следует отождествлять два эти критерия. Действительно, установившийся ток $I_{\text{кз}}$ является независимым параметром источника. А пиковый ток капельного переноса $I_{\text{кп}}$ зависит от технологических параметров процесса (электрод, режим, условия сварки) и определяется только в сварочном эксперименте. Недостатком установившегося тока $I_{\text{кз}}$ в качестве косвенного критерия переноса является еще и его статический характер, тогда как технологическое короткое замыкание имеет четко выраженный вид динамичного переходного процесса длительностью всего в несколько миллисекунд. Очевидно, что для экспрессной оценки источников необходим эксперимент, имитирующий технологическое короткое замыкание, но не требующий проведения сварки.

Пиковый ток переходного процесса «нагрузка–короткое замыкание» $I_{\text{п-к}}$ — косвенный критерий оценки источников по качеству переноса с технологическими короткими замыканиями, определяемый в специальном электротехническом эксперименте [24]. Такой эксперимент с электрическим моделированием реальных процессов переноса начинается с нагружения источника на балластный реостат, используемый вместо дуги. Изменяя сопротивление балластного реостата и одновременно пользуясь регулятором источника, устанавливают параметры $I_{\text{св}}$ и $U_{\text{св}}$ на стадии «нагрузка». При этом имитируется один из нормальных режимов сварки (например, для электрода диаметром 2 мм — 60 А и 21 В). Затем зажимы реостата резко закорачивают, имитируя стадию «короткое замыкание». Возникающий при этом переходный процесс фиксируют записывающим прибором — двухканальным запоминающим осциллографом или автоматическим регистратором. На осциллограмме тока (рис. 9.13, а) выделяется участок, соответствующий типичной длительности короткого замыкания каплей для установленного режима (например $t_{\text{кз}} = 8$ мс для того же электрода диаметром 2 мм). Максимальное значение тока на этом участке и считается пиковым током переходного процесса «нагрузка–короткое замыкание» $I_{\text{п-к}}$. Для приведенной на рис. 9.13, а осциллограммы $I_{\text{п-к}} = 105$ А. Поэтому его относительное значение $I_{\text{п-к}}/I_{\text{св}} = 1,75$, тогда как для реального технологического короткого замыкания с таким электродом среднее значение $I_{\text{кп}}/I_{\text{св}} = 1,63$ (табл. 9.5). Это хорошее совпадение, что говорит об адекватности модели реальному короткому замыканию каплей.

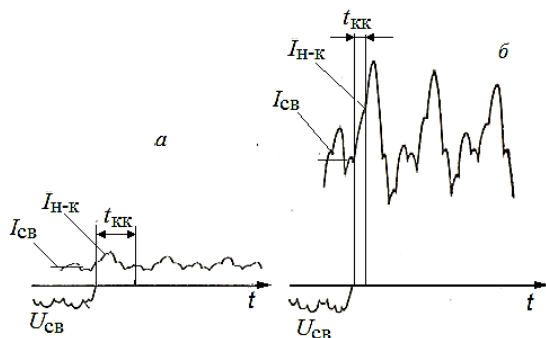


Рис. 9.13. Переходный процесс «нагрузка–короткое замыкание» при определении тока $I_{Н-К}$: а — 60 А, 21 В; б — 300 А, 25 В (трехфазная мостовая схема)

При эксперименте на больших токах (рис. 9.13, б) такого совпадения уже не наблюдается — в электротехническом эксперименте $I_{Н-К}/I_{СВ} = 1,65$, а при сварке $I_{КП}/I_{СВ} = 1,39$. Это расхождение в работе [24] объясняют преобладанием в переносе мелких капель, при которых в реальном процессе короткое замыкание прерывается раньше достижения амплитудного значения тока. Для таких режимов рекомендуется измеренную величину $I_{Н-К}$ уменьшать на 15–20 %.

По итогам массового модельного эксперимента в работе [24] на высоких режимах 200–300 А из условий обеспечения качественного переноса рекомендованы значения

$$1,3 \leq I_{Н-К}/I_{СВ} \leq 1,9.$$

А для режимов малых токов 60–100 А с учетом опасности прилипания электрода к ванне рекомендованы более высокие значения

$$1,4 \leq I_{Н-К}/I_{СВ} \leq 2,2.$$

9.4. Управление переносом при ручной сварке

Форсирование дуги (arcforcing) — специальная функция современного источника, направленная на интенсификацию переноса с целью предотвращения прилипания электрода к ванне. Она заключается в кратковременном увеличении мощности источника — на время касания капель ванны. Форсирование выполняется одним из трех способов: за счет мощного вспомогательного источника — низковольтной подпитки; с использованием участка короткого замыкания у комбинированной

внешней характеристики основного источника; за счет автоматического устройства, генерирующего импульс тока в момент переноса.

1) Низковольтная подпитка обычно выполняется нерегулируемой, поэтому ее параметры принимают так, чтобы удовлетворить требования только наиболее востребованных режимов и электродов. Например, подпитка с $U_x = 10\text{--}12$ В и $\rho_i = -0,02\ldots -0,03$ В/А при сварке электродами УОНИ 13/55 диаметром 3 и 4 мм обеспечивает ток форсирования $I_\phi = 150\text{--}300$ А, достаточный для предупреждения прилипания. Вступает в действие подпитка практически одновременно с началом короткого замыкания каплей, как только напряжение основного источника упадет ниже напряжения подпитки.

2) Источник с комбинированной внешней характеристикой, как правило, имеет в своем составе тиристорный выпрямительный блок или транзисторный инвертор. Участок форсирования 4 (см. рис. 4.24), формируется системой управления с помощью обратных связей по току и напряжению. Такой участок, настроенный для сварки электродом с основным покрытием диаметром 3 мм, должен обеспечивать I_ϕ около 150 А. Поэтому короткое замыкание каплей закончится при $t_{\text{кк}} \leq 9$ мс, что предотвратит прилипание в любых пространственных положениях.

3) В современных источниках по отдельности настраивают сварочный ток и ток короткого замыкания. Но в случае синергетического управления переносом МП-система вместо независимой настройки тока $I_{\text{кз}}$ в амперах может использовать устройство задания тока $I_{\text{кз}}$ в виде функции от $I_{\text{сву}}$. Так, регулятором в составе тиристорного выпрямителя ВДУ-306МТ задают коэффициент форсирования $k_\phi = I_\phi/I_{\text{сву}}$ в зависимости от настроенного сварочного тока и типа электродного покрытия, а также от пространственного положения шва (табл. 9.6).

Таблица 9.6.

Коэффициент форсирования k_ϕ (выпрямитель ВДУ-306МТ)

Тип покрытия	Пространственное положение шва	Диапазон токов, А		
		менее 125	125–175	более 175
Рутиловое	Нижнее	1,0	1,0	1,0
	Вертикальное снизу вверх	1,3	1,2	1,1
	Вертикальное сверху вниз	1,4	1,3	1,2
	Потолочное	1,5	1,4	1,3
Основное	Нижнее	1,2	1,1	1,0
	Вертикальное снизу вверх	1,4	1,3	1,2
	Вертикальное сверху вниз	1,5	1,4	1,3
	Потолочное	1,6	1,5	1,4
Целлюлозное	Нижнее	1,3	1,2	1,1
	Вертикальное снизу вверх	1,5	1,4	1,3
	Вертикальное сверху вниз	1,6	1,5	1,4
	Потолочное	1,7	1,6	1,5

Покажем, как выбирались оптимальные значения k_ϕ для этого регулятора. Рассмотрим три варианта настройки коэффициента форсирования для сварки вертикального шва снизу вверх электродом УОНИ 13/55 диаметром 3 мм. При настройке $k_\phi = 1$ (рис. 9.14, а), ток короткого замыкания каплей сначала принимает естественное значение $I_{\text{кп}} = 160$ А, а затем с включением обратной связи по току снижается до настроенного сварочного — $I_\phi = I_{\text{св}} = 110$ А. Поэтому перенос чрезмерно затягивается — до $t_{\text{кк}} = 15\text{--}25$ мс (видно на развернутой правой части осциллограммы). При настроенном значении $k_\phi = 1,5$ (рис. 9.14, б) ток короткого замыкания каплей увеличивается до значения $I_\phi = 200$ А, так что короткое замыкание заканчивается за 9–20 мс, в среднем в границах регламентированной работы [41] значения 13 мс. А это существенно снижает опасность прилипания. При заданном значении $k_\phi = 2$ ток I_ϕ достигает 270 А (рис. 9.14, в), и короткое замыкание заканчивается за 8–12 мс, но сопровождается значительным разбрызгиванием. Поэтому для указанного режима оптимальным признано значение $k_\phi = 1,4$.

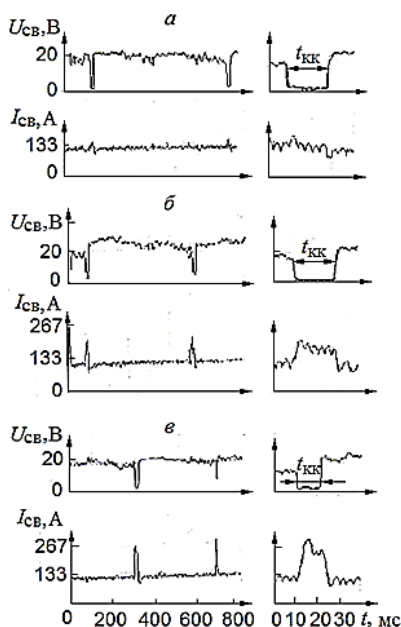


Рис. 9.14. Форсирование в зависимости от k_ϕ : 1,0 (а); 1,5 (б); 2,0 (в) (выпрямитель ВДУ-306МТ, УОНИ 13/55 Ø4 мм, 110 А, 25 В, вертикальное положение)

10. ФОРМИРОВАНИЕ СВАРНОГО ШВА

10.1. Феноменология образования сварочной ванны и шва

В энергетической системе «источник–дуга–шов» или «источник–подающий механизм–механизм перемещения–дуга–шов» плавление основного металла и образование сварочной ванны и шва — это последний этап преобразования энергии. При этом сварочные свойства источника и другого оборудования, такие как надежность зажигания, устойчивость процесса, стабильность тока и напряжения, характер переноса, а также стабильность подачи и перемещения, отражаются на шве только косвенно, через посредство дуги и сварочного процесса в целом. Поэтому оценка качества сварного шва — необходимая и обязательная операция в процедуре испытания сварочного оборудования. В последнем испытании по результатам выполнения контрольного сварного соединения формулируются ответы по двум направлениям, далее характеризующим по отдельности:

- соответствие размеров сварного шва требованиям стандартов,
- отсутствие недопустимых дефектов шва.

10.1.1. Размеры сварных швов и соединений

Механизм формирования шва при дуговой сварке глубоко и подробно проанализирован с созданием адекватных математических моделей в работах Б.М. Березовского [105–107]. С опорой на них дадим описание формирования стыкового шва с учетом действия следующих сил на сварочную ванну (рис. 10.1).

Сила тяжести F_T расплавленного металла пропорциональна объему ванны. А гидростатическое давление в ванне пропорционально ее глубине и плотности жидкого металла. В разных способах сварки объем ванны имеет порядок 10–10000 мм³. При сварке в нижнем положении сила тяжести способствует затеканию ванны в зазор или разделку между заготовками, а также заполнению полости, выплавленной дугой в заготовках. При сварке в положениях, отличных от нижнего, сила тяжести, как правило, вредит формированию шва. Усилие давления дуги на ванну F_d складывается из действия нескольких сил: напора плазменных и газовых потоков, реакции испаряющихся с активного пятна частиц, электромагнитной силы Лоренца в месте расширения линий тока, а также ударов переносимых электродных капель. Давление дуги на ванну пропорционально квадрату силы тока. Это давление приводит к образованию кратера и способствует перемещению жидкого металла от головной части ванны к хвостовой. Объемные электродинамические силы $F_{эд}$ взаимодействия линий

тока с собственным магнитным полем дуги также приводят в движение жидкий металл ванны. Величина и направление электродинамических сил определяются величиной и конфигурацией отдельных частей этих токов и магнитных потоков. Но при показанной форме ванны как проводника компоненты этих сил образуют сложную картину, вызывая хаотические движения отдельных объемов ванны и ее перемешивание. Силы поверхностного натяжения $F_{\text{пн}}$ стремятся уменьшить внешнюю площадь ванны. При сварке в положениях, отличных от нижнего, эти силы предотвращают стекание расплавленного металла, а при сварке на весу удерживают ванну в зазоре свариваемых деталей.

Форма и размеры головной части ванны, а поэтому и параметры проплавления шва определяются главным образом тепловым и механическим воздействием дуги на основной и жидкий металл. В хвостовой части на стадии, предшествующей кристаллизации шва, его форма в значительной степени определяется балансом сил тяжести и поверхностного натяжения. Флуктуации всех названных сил, как правило, оказывают полезное влияние на сварочную ванну — способствуют перемешиванию электродного металла с основным и ускорению физико-химических процессов в ванне. Но эти же флуктуации могут вызвать появление дефектов формы шва.

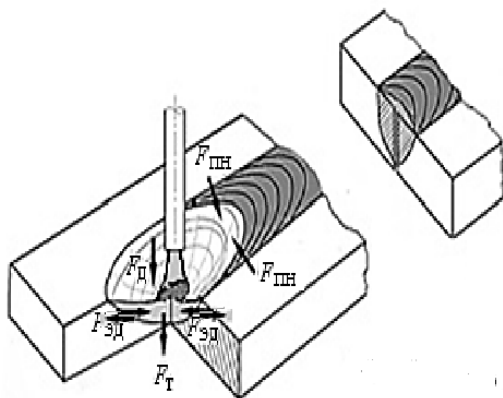


Рис. 10.1. Схема формирования стыкового шва в нижнем положении

Особенности образования ванны и формирования шва в пространственных положениях, отличных от нижнего, показаны на рис. 10.2. При наклонном расположении заготовок различают сварку на спуск и на подъем (рис. 10.2, а и б). В первом случае ванна подтекает под дугу. От этого теплопередача к основному металлу и производительность сварки снижаются в сравнении со сваркой в нижнем положении горизонтально расположенных заготовок. Во втором случае тепловложение

и производительность повышаются. При сварке горизонтального шва (рис. 10.2, *в*) трудно обеспечить его симметрию в поперечном сечении – с верхней кромки ванна стекает, а на нижнюю натекает. Вертикальный шов может выполняться снизу вверх или сверху вниз (рис. 10.2, *з* и *д*). Основной трудностью формирования вертикального шва является вытекание ванны из выплавленной между деталями полости под действием силы тяжести. Проще удержать ванну от вытекания при сварке снизу вверх. Но метод сварки сверху вниз более производительный. При выполнении потолочного шва (рис. 10.2, *е*) ванна удерживается от стекания в основном действием сил поверхностного натяжения, поэтому не может быть большой. Удержанию ванны в потолочном положении может помочь и давление дуги, но для управления им нужна высокая квалификация сварщика-потолочника.

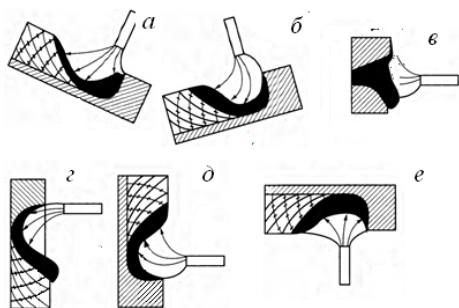


Рис. 10.2. Формирование шва в разных пространственных положениях

Геометрические параметры, характеризующие формирование разных типов швов приведены на рис. 10.3.

1) Стыковой шов в соединении без скоса кромок типа С2 (рис. 10.3, *а*):

- глубина проплавления h ,
- ширина шва e ,
- выпуклость шва g ,
- высота шва $H_{\text{ш}} = h + g$,
- площадь наплавки $F_{\text{н}}$,
- площадь проплавления $F_{\text{пр}}$,
- площадь поперечного сечения шва $F_{\text{ш}} = F_{\text{пр}} + F_{\text{н}}$.

2) Стыковой шов в соединении со скосом кромок типа С17 (рис. 10.3, *б*) дополнительно:

- ширина шва с обратной стороны e_1 ,
- выпуклость шва с обратной стороны g_1 ,
- высота шва $H_{\text{ш}} = h + g + g_1$.

3) Угловой шов в тавровом соединении типа ТЗ (рис. 10.3, в) дополнительно:

— катет на стенке k_1 ,

— катет на полке k_2 .

4) Наплавочный валик (рис. 10.3, з) дополнительно:

— шаг наплавки s ,

— перекрытие валиков t .

Качественными характеристиками внешнего формирования являются также чешуйчатость, ровность, степень заполнения разделки, степень заварки кратера.

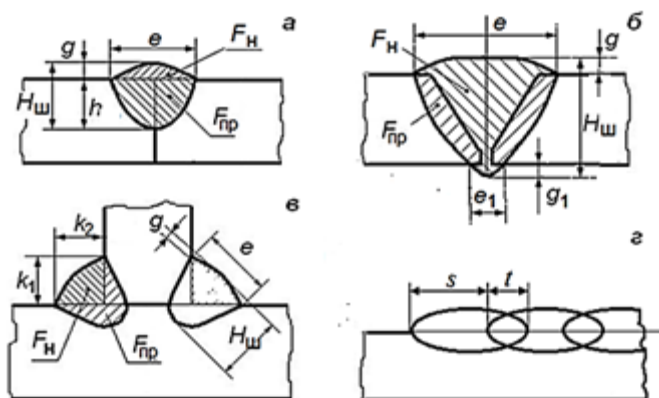


Рис. 10.3. Форма и размеры типовых швов: в соединениях С2 (а), С17 (б), ТЗ (в), при наплавке (г)

Математическое описание связи размеров шва с параметрами режима сварки представлено в технической литературе в следующих формах.

1) Эмпирические модели, основанные на обработке экспериментальных данных по измерению размеров поперечных макрошлифов и представляющие набор основных упрощенных зависимостей (глубины проплавления — от тока, ширины шва — от напряжения и т.д.) Такова, например, методика В.П. Демянцевича [165] или более удобная благодаря своей графической форме методика А.С. Бабкина [221].

2) Критериальная модель, также опирающаяся на экспериментальное определение размеров швов, но уже в зависимости не от отдельных параметров, а от комплексных критериев, характеризующих давление дуги $K_d = I_{св}^2 V_{св} / d_3$, и удельную ширину $K_{ш} = e / (I_{св} U_{св})$ [166].

3) Детерминированная модель, опирающаяся на расчет размеров кратера, например, его глубины $H_{крат}$, которая вычисляется по балансу

гидростатического давления в ванне и давления дуги на нее. С учетом толщины прослойки жидкого металла под дугой $H_{\text{прос}}$ в итоге $h = H_{\text{крат}} + H_{\text{прос}}$ [106, 167].

4) Компьютерная модель для числового расчета процессов массопереноса в гетерогенной системе, включающей дуговую каверну, расплавляемый электрод, сыпучий флюс, жидкий шлак, основной и жидкий металл и наконец, шов. Это наиболее точная модель, учитывающая все известные к настоящему времени процессы, участвующие в формировании шва, но и самая сложная, требующая специального программного обеспечения и множества справочных данных [168].

5) Детерминированная модель, опирающаяся на теорию Н.Н. Рыкалина о распространении теплоты в твердом теле, в которой размеры шва определяются по изотерме плавления основного металла. Известно большое количество ее разновидностей, учитывающих как форму источника теплоты, так и форму свариваемого изделия [159, 169, 170]. Но общим их недостатком является игнорирование фактора механического воздействия дуги на ванну.

Последнюю модель рассмотрим более подробно, поскольку в ней наглядно отражаются зависимости размеров шва от параметров режима, и, следовательно, от характеристик сварочного оборудования. На основании теории распространения теплоты площадь проплавления $F_{\text{пр}}$ зависит от энергетических параметров режима сварки. С учетом КПД проплавления $\eta_{\text{пр}}$ и удельного теплосодержания расплавленного основного металла $Q_{\text{ом}}$ эта зависимость может быть представлена в следующем виде

$$F_{\text{пр}} = \eta_{\text{пр}} I_{\text{св}} U_{\text{св}} / (V_{\text{св}} Q_{\text{ом}}).$$

В приблизительном расчете КПД проплавления для ручной сварки можно принимать в диапазоне $\eta_{\text{пр}} = 0,05-0,15$, при механизированной сварке в активных защитных газах $0,06-0,26$, а при автоматической сварке под флюсом — $0,1-0,5$. Причем максимальные значения $\eta_{\text{пр}}$ относятся к более мощным режимам и высоким скоростям сварки. Теплосодержание расплавленной стали с учетом скрытой теплоты плавления принимают $Q_{\text{ом}} = 10 \text{ Дж/мм}^3$. Вычисления отдельных размеров шва, таких как глубина проплавления и ширина шва, при известной величине $F_{\text{пр}}$ могут выполняться по следующим уравнениям:

$$h = \sqrt{\frac{F_{\text{пр}}}{\Psi_{\text{пр}} \mu_{\text{пр}}}} \quad \text{и} \quad e = \sqrt{\frac{F_{\text{пр}} \Psi_{\text{пр}}}{\mu_{\text{пр}}}}.$$

Значения коэффициентов формы проплавления $\Psi_{\text{пр}} = e/h$ и полноты проплавления $\mu_{\text{пр}} = F_{\text{пр}}/(eh)$ для конкретного способа сварки можно принять из [159]. Типичные значения $\Psi_{\text{пр}}$ и $\mu_{\text{пр}}$ указаны в разд. 10.1.2.

Приведенные формулы дают только общее представление о связи размеров шва с энергетическими параметрами режима. Экспериментальные же зависимости (рис. 10.4) обнаруживают значительные отклонения от линейной связи параметров $I_{св}$, $U_{св}$ и $V_{св}$ с геометрическими характеристиками шва.

10.1.2. Зависимости размеров шва от параметров режима и характеристик оборудования

Наиболее полно зависимости и приемы воздействия на геометрические параметры швов отражены в работах [106, 159, 171–174, 226].

Глубина проплавления h :

— увеличивается при увеличении тока и уменьшении скорости сварки и почти не зависит от напряжения или длины дуги (рис. 10.4);

— уменьшается при увеличении диаметра электрода (в случае сохранения неизменным тока), поскольку при этом снижается плотность тока в электроде и уменьшается концентрация давления дуги на ванну;

— увеличивается при предварительном и сопутствующем подогреве свариваемых заготовок, а также в результате их нагрева предыдущими проходами, в частности при замыкании кольцевого шва;

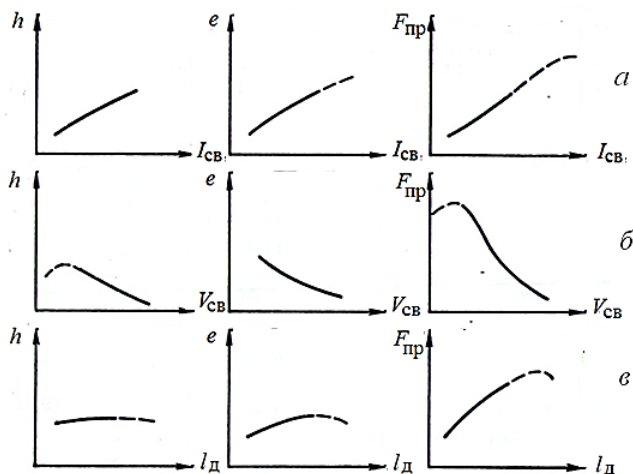


Рис. 10.4. Типовые зависимости размеров шва от энергетических параметров режима [159]

— зависит от рода тока и полярности дуги (при сварке плавящимся электродом на постоянном токе дугой обратной полярности наиболее высока, а при сварке на переменном токе снижается на 15–20 %, при сварке дугой прямой полярности — на 40–50 %);

— увеличивается при уменьшении прослойки расплавленного металла под дугой, в частности при сварке на подъем и при наклоне электрода углом назад, при погружении электрода в ванну, а также при сварке в пространственных положениях, отличных от нижнего — потолочном и особенно вертикальном снизу вверх;

— увеличивается при увеличении зазора между свариваемыми деталями и мало зависит от угла скоса их кромок;

— при импульсно-дуговой сварке, а также при сварке с импульсной подачей проволоки увеличивается не менее 30 % благодаря увеличению пульсации давления дуги на ванну, которая смещается к хвостовой части, открывая дуге доступ к основному металлу;

— увеличивается при увеличении расхода защитного газа, а также при подаче газов с большим теплосодержанием, передаваемым основному металлу: гелия вместо аргона при сварке неплавящимся электродом, многоатомных газов (CO_2 , H_2 , O_2) вместо аргона или в виде добавок к нему при сварке плавящимся электродом, многокомпонентных газов, например, *T.I.M.E.*-смеси при сварке на форсированных режимах и при импульсной и попеременной подаче разных газов;

— увеличивается при снижении поверхностного натяжения металла ванны (например, введением в микродозах серы, кислорода);

— увеличивается при использовании активаторов — соединений щелочных и щелочно-земельных металлов — на поверхности или в составе сварочных проволок;

— увеличивается при подаче тонким слоем активирующего флюса на основе оксидов, хлоридов и фторидов при аргонодуговой сварке благодаря сжатию столба и увеличению давления дуги;

— увеличивается при питании дуги высокочастотным источником, поскольку при этом уменьшается площадь активных пятен и повышается степень контрагирования столба дуги;

— зависит от внешнего магнитного поля, взаимодействующего с током дуги (при наложении поперечного постоянного поля дуга отклоняется по направлению сварки или против него, соответственно уменьшая или увеличивая глубину проплавления);

— при многоэлектродной сварке и наплавке зависит от количества электродов и их формы (например, лента), расположения электродов относительно направления сварки, рода тока и его модулирования в каждом электроде;

— при сварке разнотолщинных деталей сближается на обеих заготовках смещением дуги к более толстой из них или изготовлением на ней бурта сопоставимой с тонкой деталью толщины.

Ширина шва e :

- увеличивается при увеличении напряжения и тока и уменьшении скорости сварки (рис. 10.4);
- увеличивается при повышении пульсаций напряжения источника;
- увеличивается при наложении переменного магнитного поля, периодически отклоняющего дугу поперек оси шва;
- увеличивается при использовании порошковой проволоки, благодаря чему шов в поперечном сечении принимает более сглаженную форму и снижается опасность несплавления по кромкам широкой разделки.

Выпуклость шва g назначается в зависимости от ширины шва для обеспечения плавных очертаний и равнопрочности шва с основным металлом. Выпуклость лицевой стороны, например, при автоматической сварке соединения С17 на толщинах от 8 до 24 мм стандартами допускается в интервале 0,5–3,5 мм. Выпуклость обратной стороны стыкового шва допускается от – 0,5 (незначительная вогнутость) до +2 мм для предотвращения непровара. При сварке тонкого металла на весу недопустимо чрезмерное провисание ванны, приводящее к вогнутости лицевой стороны шва и большой выпуклости обратной.

Катет углового шва k назначается в зависимости от толщины более тонкой из соединяемых деталей, но не менее 2 мм. Например, при автоматической и механизированной сварке соединения Т1 при толщине деталей в интервале 3–19 мм катет назначают от 3 до 7 мм.

Комплексные размерные характеристики швов.

1) Коэффициент формы проплавления определяется по уравнению $\Psi_{\text{пр}} = e/h$ (рис.10.3). Он изменяется в зависимости от соотношения напряжения и тока в широком диапазоне от 0,3 (автоматическая сварка под флюсом) до десятков (наплавка). При сварке стыкового соединения без скоса кромок рациональны значения $\Psi_{\text{пр}} = 0,8\text{--}4,0$, принимаемые на основе компромисса между технологической прочностью шва и экономией энергии.

2) Коэффициент полноты проплавления $\mu_{\text{пр}} = F_{\text{пр}}/(eh)$ характеризует степень заполнения швом прямоугольника с размерами e и h . Значения $\mu_{\text{пр}} = 0,6\text{--}0,8$ у шва с параболической формой в сечении характерны для большинства способов сварки плавящимся электродом. Но при использовании источников теплоты с высокой степенью контрагирования дуги (сварка аргонодуговая, плазменная, трехфазной дугой) шов приобретает Т-образную форму, при которой $\mu_{\text{пр}} < 0,6$.

3) Коэффициент формы валика определяется по уравнению $\Psi_{\text{в}} = e/g$ (рис.10.3).

4) Коэффициент полноты валика $\mu_{\text{в}} = F_{\text{в}}/(eg)$ характеризует степень заполнения валиком прямоугольника с размерами e и g (рис. 10.3, а).

5) Полная площадь поперечного сечения шва $F_{\text{ш}}$ кроме площади проплавления $F_{\text{пр}}$, отражающей участие в ванне и шве расплавляемого основного металла, включает в себя еще и площадь наплавки $F_{\text{н}}$, отражающую участие наплавленного электродного металла ($F_{\text{ш}} = F_{\text{пр}} + F_{\text{н}}$). Итак, доля участия основного металла в шве определяется по формуле

$$\Theta_{\text{ом}} = F_{\text{пр}} / (F_{\text{пр}} + F_{\text{н}}).$$

Соответственно доля участия электродного металла

$$\Theta_{\text{эл}} = F_{\text{н}} / (F_{\text{пр}} + F_{\text{н}}) = 1 - \Theta_{\text{ом}}.$$

Доли участия основного и электродного металла влияют на химический состав получающегося при их смешивании металла шва. При сварке неплавящимся электродом без присадки шов образуется только расплавлением основного металла – $\Theta_{\text{ом}} = 1$. При сварке плавящимся электродом без разделки кромок доля основного металла в шве относительно велика (рис. 10.3, а) – $\Theta_{\text{ом}} = 0,3-0,55$ [159]. При наличии скоса кромок шов состоит в основном из электродного металла (рис. 10.3, б). А при наплавке с целью лучшего ее легирования принимают меры для снижения участия основного металла (рис. 10.3, в).

10.1.3. Дефекты сварных швов и их зависимость от характеристик оборудования

Механизм вредного воздействия нарушений дугового процесса на качество сварки, может быть, например, таким. В момент обрыва дуги из-за прекращения действия силы давления дуги происходит «схлопывание» сварочной ванны, т.е. ее откат от фронта кристаллизации шва (влево на рис. 10.1). При этом наблюдается также захват растущими дендритами частиц шлака и газовых пузырьков. Последующее повторное зажигание дуги вызовет резкое электромагнитное воздействие и газодинамический удар по капле и ванне. Удар по капле может привести к ее выбросу за пределы ванны, т.е. к сильному разбрызгиванию. А удар по ванне может вызвать ее выплескивание и нехватку жидкого металла для формирования непрерывного ровного шва. В лучшем случае после восстановления дуги и сварочной ванны в этом месте кристаллизуется грубый слой шва (чешуйка), не полностью сплавляющийся с предыдущим слоем.

При особенно длительных нарушениях дугового процесса значительно снижается температура жидкого металла в кратере, что приводит к застреванию в металлической ванне частиц шлака и газовых пузырьков, в других условиях свободно всплывающих к поверхности ванны. Действительно, на участках с нарушениями дугового процесса в швах

обнаруживаются локальная пористость и неметаллические включения, а также местные несплавления шва с кромками свариваемых деталей.

Наружные дефекты — это непровар, прожог, наплыв, подрез.

1) Непровар корня шва — это по ГОСТ 2601-84 частичное несплавление кромок с обратной стороны шва (рис. 10.5, а). Это самый распространенный и опасный дефект формирования шва. При непроваре в 10 % от толщины изделия временное сопротивление, характеризующее статическую прочность стыкового соединения при растяжении и изгибе, снижается на 15–35 %, предел выносливости при знакопеременной нагрузке снижается на 40–70 %, а работа разрушения при испытании на удар — не менее, чем вдвое. Непровар наблюдается при малой погонной энергии дуги, недостаточной для проплавления свариваемых деталей на их полную толщину или для сквозного проплавления при туплении у деталей со скосом кромок. Проблема предупреждения непровара со стороны сварочного оборудования решается увеличением и стабилизацией глубины проплавления деталей любым из вышеописанных приемов — увеличением тока, снижением скорости сварки и т.д. Непровар может быть предотвращен и чисто металлургическими приемами, способствующими смачиванию жидким металлом кромок и затеканию ванны в зазор между заготовками [175].

Неспавление по кромке вдали от корня шва также обнаруживается при плохом смачивании основного металла расплавленным электродным, но считается внутренним дефектом. Оно выявляется на изломе в виде отслоения шва по поверхности кромок. Такой дефект так же абсолютно недопустим.

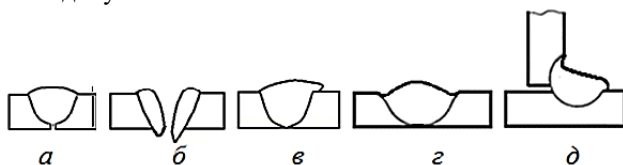


Рис. 10.5. Типичные наружные дефекты сварных швов

2) Прожог — сквозное отверстие на месте шва (рис. 10.5, б), возникающее из-за вытекания ванны под действием сил тяжести и давления дуги [175]. Особенно часто прожог появляется при сварке тонкого металла на весу, а также при выполнении корневого прохода в соединениях со скосом кромок. Причем силы поверхностного натяжения могут препятствовать прожогу, удерживая ванну между соединяемыми кромками, или способствуют прожогу, стягивая расплавленный металл к этим кромкам по отдельности и мешая их соединению [173]. Для предотвращения прожогов следует использовать низкие режимы, ограничить или отказаться от подачи присадочного металла (аргонодуговая

сварка неплавящимся электродом), использовать сварку пульсирующей дугой и принимать другие меры для уменьшения провисания ванны (рассредоточивать тепловое и механическое воздействия дуги на ванну, ограничивать зазор и смещение кромок, использовать подкладки и утолщенные вставки) [173, 174].

3) Наплыв — это натекаание расплавленного металла на основной без сплавления с ним (рис. 10.5, в). Так же называют участок шва, образовавшийся при краевом угле смачивания на границе между сварочной ванной и основным металлом более 90° [174]. При сварке в нижнем положении наплыв возникает при сочетании малой ширины и большой выпуклости шва. Поэтому для предупреждения наплывов следует увеличивать напряжение дуги и при этом снижать скорость плавления электрода. Особенно остро стоит проблема наплывов при сварке горизонтального шва на вертикальной или наклонной поверхности, а также при выполнении углового шва методом «в угол» (рис. 10.5, д). В этих случаях решение проблемы — в кантовке свариваемого изделия в положение, удобное для симметричного формирования ванны, снижении погонной энергии и уменьшении катета, в частности использование разнокатетных соединений (катет на стенке меньше, чем на полке).

4) Подрез — это продолговатое углубление по линии сплавления шва с основным металлом (рис. 10.5, з). Он возникает, если полость, образовавшаяся при плавлении основного металла, только частично заполняется сварочной ванной при большой скорости сварки, а также из-за чрезмерного действия на ванну сил тяжести или поверхностного натяжения [174]. При сварке в нижнем положении для предупреждения образования подрезов необходимо подогревать детали, уменьшать сварочное напряжение или увеличивать подачу присадочного (электродного) металла [107]. Снижается вероятность образования подрезов при поперечных колебаниях электрода или дуги, например, действием переменного магнитного поля, при наклоне электрода углом вперед или сварке на спуск, а также при многодуговой сварке. Острее проблема при сварке в пространственных положениях, отличных от нижнего. Здесь для предупреждения вытекания ванны и сильного ее деформирования рекомендуется снижение тока и скорости сварки.

Зависимость появления дефектов формы шва и наружных дефектов от параметров режима удобно проиллюстрировать на примере аргонодуговой сварки тонкостенных изделий [176] (рис. 10.6).

Наиболее значительное влияние на размеры шва и его форму оказывают ток $I_{св}$ и скорость сварки $V_{св}$. Зона режимов 1 ограничивает допустимые пределы их варьирования при номинальных и стабильных значениях других параметров. Если же разрешить небольшую неста-

бильность параметров, то зона высокого качества сужается до границ участка 2.

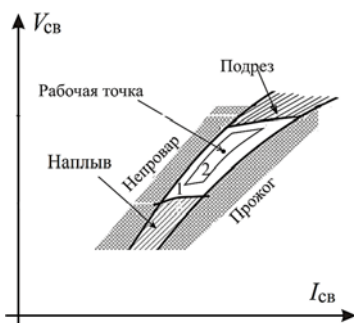


Рис. 10.6. Зоны качества при аргонодуговой сварке [176]

Внутренние дефекты — трещины, поры, шлаковые включения. Некоторые дефекты, зарождаясь внутри ванны или шва, затем выходят наружу — это поздраватость, свищи, наружные, в том числе сквозные, трещины.

1) Трещина — самый опасный из внутренних дефектов шва, резко ослабляющий сварную конструкцию, особенно при действии усталостных и ударных нагрузок (рис. 10.7, а). Эксплуатация соединений с такими дефектами недопустима. Опасность микроскопических трещин усугубляется невозможностью их обнаружения невооруженным глазом. Горячие трещины обычно возникают в процессе кристаллизации сварочной ванны при сочетании двух неблагоприятных факторов — действии внутренних растягивающих напряжений и наличии еще не закристаллизовавшихся жидких прослоек. Холодные трещины появляются в металле шва или околошовной зоны при относительно низких температурах на растягиваемых внутренними сварочными напряжениями участках с низкопластичной закаленной или насыщенной водородом структурой. В изломе трещины различают по цвету — у горячих трещин поверхности окисленные и поэтому более темные. И те, и другие трещины предотвращаются комплексом металлургических и технологических приемов, а от сварочного оборудования зависят в меньшей степени.

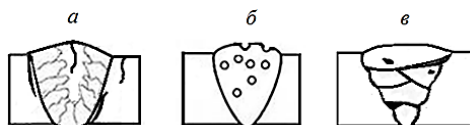


Рис. 10.7 Типичные внутренние дефекты сварных швов

2) Поры — полости внутри шва, заполненные газами (рис. 10.7, б). Поры образуются из газовых пузырьков, не успевших покинуть сварочную ванну до ее полной кристаллизации. В свою очередь, пузырьки образуются из растворенных в жидком металле газов (H_2 , N_2 , CO и др.), если их суммарное парциальное давление стало выше давления окружающей атмосферы. Из названных газов наиболее вреден водород, потому что он продолжает выделяться даже после кристаллизации в микронесплошности сварного шва, вызывая его охрупчивание. Для борьбы с порами защищают ванну от попадания в нее газов из воздуха и сварочных материалов, а также способствуют выделению газов из ванны. При небольшом количестве и размерах такие дефекты могут считаться допустимыми (см., например, ГОСТ 9466-75).

При ручной сварке принимают меры для обеспечения короткой дуги ($l_d < d_s$), способствующей качественной газовой и шлаковой защите дуги, электродных капель и ванны (устойчивый процесс, стабильность параметров, мелкокапельный перенос, недопущение козырьков на электродном покрытии и т.д.). Поскольку измерение длины дуги в процессе сварки затруднительно, то о ее стабильности судят по стабильности напряжения. А вспомогательным критерием при этом считают пороговое напряжение порообразования — напряжение дуги, при превышении которого поры в шве возникают часто и закономерно [177]. Для большинства известных электродов с рутиловым и основным покрытием диаметром от 2,5 до 4 мм пороговое напряжение $U_{д.пор} = 26-37$ В, что на 25–45 % выше нормального напряжения дуги $U_d = 21-27$ В [177, 178]. При переносе с короткими замыканиями и особенно в случае прилипания электрода к ванне, что наиболее вероятно при сварке в пространственных положениях, отличных от нижнего, защита существенно ухудшается, что также приводит к образованию пор.

Роль сварочного оборудования в предупреждении порообразования заключается в помощи вышеуказанным технологическим приемам. Например, при ручной сварке для обеспечения короткой дуги, способствующей качественной защите ванны от воздуха, источник должен иметь напряжение, ограниченное жестким 2 участком ВАХ (см. разд. 4.7.1)

Особенно актуальна проблема «стартовой» пористости, связанная с низкой устойчивостью процесса в течение начального интервала 1–3 с после зажигания дуги, а также с высокой скоростью кристаллизации ванны в этом интервале. Решение проблемы — горячий пуск, т.е. кратковременное начальное увеличение мощности дуги (см. разд. 1.4.1).

3) Шлаковые включения (рис. 10.7, в) — это оксиды, нитриды, сульфиды, фосфиды и другие неметаллические соединения, пришедшие в сварочную ванну и не успевшие удалиться в шлак. Различают вклю-

чения экзогенные, т.е. попавшие в шов из флюса, электродного покрытия и с кромок свариваемых деталей, и эндогенные, образовавшиеся в ванне при протекании окислительно-восстановительных и рафинирующих реакций. Если включения в мелкодисперсном состоянии равномерно распределены по всему шву, то они, как правило, не снижают прочность шва. Но в случае их отложения в виде более крупных конгломератов, и особенно в виде прослоек по границам зерен и по линии сплавления с основным металлом, прочность сварного соединения, в том числе технологическая, может снизиться существенно. Эндогенные включения имеют размеры всего в несколько микрометров, но встречаются систематически. Экзогенные включения гораздо больше по размерам, но встречаются реже, поскольку возникают в основном из-за нарушений технологии сварки — при некачественной подготовке поверхности заготовок, при зашлаковках в многослойных швах и т.д. Роль оборудования в предупреждении образования экзогенных включений сводится к обеспечению устойчивого процесса.

Более подробная классификация дефектов сварных швов и соединений приведена в ГОСТ Р ИСО 6520-1- 2012 [237].

10.2. Стабилизация геометрических параметров шва

10.2.1. Непосредственные критерии формирования

Определение размеров, если они внешне доступны — ширины шва, катетов, выпуклости лицевой и обратной стороны шва — просто и легко производится обычным мерительным инструментом (линейка, штангенциркуль, шаблон). Более точные и массовые измерения внешнего профиля шва в поперечном и продольном направлениях могут выполняться с помощью лазерного сканера [179]. Но большинство наиболее важных размеров обнаруживается только в поперечном сечении шва — глубина и площадь проплавления, перекрытие валиков и слоев, проплавление кромок свариваемых заготовок. Для их измерения потребуется трудоемкая подготовка, заключающаяся в вырезке и травлении макрошлифов поперечного сечения шва.

Абсолютные значения геометрических параметров h , e , g , $H_{ш}$, e_1 , g_1 , k , определяемые при наплавке валика на пластину по методике ГОСТ 25616-83 или при выполнении контрольного сварного соединения — непосредственные критерии оценки формирования шва. Их нормы и допустимые отклонения регламентированы следующими стандартами:

— ГОСТ 5264-80 Ручная дуговая сварка. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры;

— ГОСТ 14771-76 Дуговая сварка в защитных газах...;
— ГОСТ 8713-79 Автоматическая сварка под флюсом...;
— ГОСТ 14806-80 Дуговая сварка алюминия и алюминиевых сплавов в инертном газе...

Дефекты, их количество и размеры — непосредственные критерии формирования сварного шва, равнозначные с критериями геометрических параметров для заключения о качестве и годности шва. Их объективная оценка должна основываться на физических методах контроля, а также на высокоинформативных механических методах с разрушением образцов по участкам возможного расположения дефектов. Допустимость того или иного дефекта должна регламентироваться нормативной документацией в зависимости от условий эксплуатации и ответственности сварной конструкции [218, 219].

Предельные и средние значения (например, $h_{\min} \dots h_{\max}$ и $h_{\text{ср}}$), *абсолютные отклонения* ($\Delta h = h_{\max} - h_{\text{ср}}$, или $\Delta h = h_{\min} - h_{\text{ср}}$) и *относительные отклонения* ($\Delta h/h_{\text{ср}}$) от среднего значения для вышеназванных геометрических параметров — непосредственные критерии стабильности формирования шва по величине их разброса. Измерения доступных для внешнего наблюдения размеров (в том числе на порезанных для механических испытаний образцах) выполняются не менее, чем в трех сечениях, равномерно расположенных по длине шва, за исключением начального и конечного участков длиной, равной длине кратера.

Среднеквадратические отклонения (σ_h , σ_e и др.) и *коэффициенты вариации* (k_{vh} , k_{ve} и др.) *геометрических параметров* — более информативные непосредственные критерии, поскольку они являются статистическими характеристиками массовых измерений размеров шва — величин, случайных по их метрологической сущности.

Ровность сварного шва может быть оценена измерением профиля шва в поперечном и продольном направлениях с помощью инструментального контактного профилометра. Качество и производительность измерений повышаются при лазерном сканировании поверхности шва (рис.10.8). Ровность характеризуется отклонениями фактического профиля внешней поверхности 1 шва от эталонной сегментной поверхности 2 фигуры с той же средней шириной и выпуклостью.

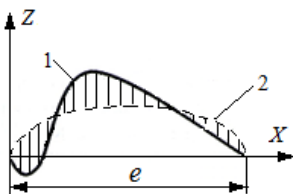


Рис. 10.8. К вычислению отклонений фактического (1) профиля шва от эталонного (2) [179]

В качестве числовой характеристики ровности принимают площадь фигуры, заштрихованной на рис. 10.8, которая представляет собой интеграл отклонения фактического профиля шва z_{ϕ} от эталонного z_{ε} :

$$\Delta F = \int_0^e |z_{\phi} - z_{\varepsilon}| dx$$

В этом случае объективным непосредственным критерием ровности шва $Q_{\text{ровн}}$ может быть отношение площади ΔF к площади эталонного наплавленного валика $F_{\text{н}}$: $Q_{\text{ровн}} = \Delta F / F_{\text{н}}$ или $Q_{\text{ровн}} = (\Delta F / F_{\text{н}}) \cdot 100 \%$.

Некоторые характеристики металла шва и сварного соединения нами рассмотрены, но отвергнуты в качестве критериев формирования. Например, в работе [49] в число таких критериев включены характеристики тепловых процессов — температура и скорость охлаждения металла шва и околошовной зоны. Не подлежит сомнению сильное влияние тепловых процессов на структуру и химический состав металла, в свою очередь влияющих на прочностные и коррозионные свойства сварного соединения. Но в основном эти свойства связаны с металлургическими и технологическими характеристиками сварки, а от параметров оборудования практически не зависят. Поэтому далее тепловые процессы при оценке сварочных свойств оборудования не учитываются. По этой же причине не рассматривается влияние на формирование шва дефектов сборки (неравномерный зазор, смещение кромок и др.).

Оперативное измерение геометрических параметров в процессе сварки выполняется с использованием видеокамеры и сканирующего 3D-лазера. Синхронная компьютерная обработка видеосигнала позволяет в масштабе реального времени (*on-line*) измерять и фиксировать в виде графиков доступные для внешнего наблюдения размеры — $e(t)$, $g(t)$ и др. Так, в работе [180] при аргонодуговой сварке выполнялся мониторинг размеров сварочной ванны (рис. 10.9) — длины $L_{\text{в}}$, ширины $E_{\text{в}}$ и выпуклости $G_{\text{в}}$.

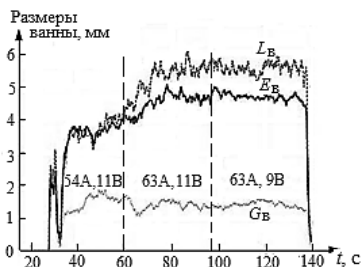


Рис. 10.9. Аргонодуговая сварка с возмущениями по току (54–63 А) и по напряжению (11–9 В) [180]

Например, при токе 63 А с точностью не хуже 0,2 мм получены следующие размеры $L_b = 5,5$ мм, $E_b = 4,8$ мм (E_b — величина, близкая к ширине e будущего шва), $G_b = 1,5$ мм (величина, близкая к выпуклости g шва).

Оперативное измерение глубины проплавления $h(t)$ в процессе сварки затруднительно. Оно экономически оправдано только в массовом производстве длинных сварных конструкций (изготовление труб, сварных профилей и пр.), где возможно применение сложных систем автоматизированной интроскопии, например, с датчиками косвенного измерения глубины проплавления по температуре или свечению обратной стороны шва [49].

10.2.2. Характеристики оборудования, влияющие на стабильность размеров шва

Выше была показана сильная прямая зависимость глубины проплавления от тока и ширины шва от тока и напряжения, а также обратная зависимость обоих размеров от скорости сварки. Поэтому стабильность энергетических параметров режима $I_{св}$, $U_{св}$ и $V_{св}$ является обязательным условием стабильности площади и формы поперечного сечения шва. Общие принципы стабилизации режима были изложены в разд. 6. Поэтому здесь только конкретизируются числовые значения характеристик оборудования, гарантирующие высокую стабильность параметров режима, а поэтому и стабильность размеров шва.

Для стабилизации энергетических параметров используются как системы автоматического регулирования с обратными связями по току, напряжению или скорости, так и системы параметрической стабилизации, имеющие в своем составе элемент со специфическим свойством постоянства какого-либо из названных параметров режима ($I_{св}$, $U_{св}$, $V_{св}$). Рассмотрим особенности тех и других систем для отдельных способов и методов сварки.

При ручной сварке стабилизации тока (и глубины проплавления) на уровне $\pm 10\%$ при стабильном напряжении сети способствует использование источников с наклоном падающей характеристики $\rho_{н} < -0,4$ В/А. У конвенционального источника параметрическая стабилизация тока обеспечивает такой наклон благодаря использованию в его составе трансформатора с сопротивлением $X_{н}$ более 0,3 Ом. А в современных источниках с комбинированной внешней характеристикой благодаря обратной связи по току достижимо, например, $\rho_{н} = -5$ В/А [181].

При аргонодуговой сварке неплавящимся электродом стабильности тока (и глубины проплавления) способствует широкая практика исполь-

зования источников с еще более крутым наклоном — до почти вертикального. Как и в отношении любых сварочных свойств, наилучших результатов добиваются при согласованном действии электротехнических и технологических приемов. Из технологических приемов для повышения стабильности размеров шва рекомендуются заточка электрода на угол 30° , а также ограничение тока для электродов диаметром 1; 1,6 и 2 мм значениями соответственно 90, 190 и 270 А.

Для стабилизации напряжения (и ширины шва) при механизированной и автоматической сварке с постоянной скоростью подачи проволоки предъявляют специальные требования к источнику. У применявшихся ранее нестабилизированных источников типичные колебания сетевого напряжения $\pm 10\%$ приводят к колебаниям сварочного напряжения $\pm 2\text{--}4$ В и ширины шва до 15% . А для гарантии устойчивого процесса и стабильной ширины шва допускаются колебания не более 1,5 В [56]. Проблема решается внедрением стабилизированных источников, у которых отмечены колебания сварочного напряжения не более 0,5–1 В.

Для стабилизации тока (и глубины проплавления) при механизированной и автоматической сварке необходима стабилизация скорости подачи электродной проволоки — по ГОСТ 18130-79 и ГОСТ 8213-73 не хуже 10 и 8 % соответственно. Для скорости подачи учтем только два возмущения — по напряжению питания привода и по сопротивлению подаче проволоки. Тогда стабильность напряжения питания должна быть не хуже $\pm 5\%$, и жесткость механической характеристики привода подачи не хуже 5 %. Но современные тиристорные и транзисторные приводы с обратными связями по частоте вращения или ЭДС якоря коллекторного двигателя отрабатывают оба названные и некоторые другие возмущения, и поэтому обеспечивают значительно лучшую стабильность скорости подачи — не хуже 4 % (см. разд. 6.5.3). Перспективны также и системы непосредственной стабилизации сварочного тока, а не только скорости подачи. Эффективны и двухконтурные системы стабилизации: тока — с помощью привода, напряжения — с помощью источника.

Для стабилизации скорости сварочного перемещения при автоматической сварке (согласно требованиям ГОСТ 8213-73 не хуже 8 %) используют в простейшем случае асинхронный двигатель, а в современных аппаратах с плавной настройкой скорости сварки — привод с коллекторным двигателем. У механизма перемещения с асинхронным трехфазным двигателем, обладающим свойством параметрической стабилизации, при полной нагрузке и пониженном на 10 % напряжении питания скорость снижается не более 5 %. Но и транзисторный привод с коллекторным двигателем при таких условиях гарантирует стабильность в пределах нормы 8 % (разд. 6.5.2).

10.3. Контрольные сварные соединения (КСС)

10.3.1. Типы КСС.

С целью заключительной оценки функциональной пригодности сварочного оборудования для конкретного способа и режима сварки предлагается вместо наплавки валика, производимой по требованиям ГОСТ 25616-83, выполнять контрольное сварное соединение (КСС). Очевидно, что такая методика сложнее и дороже традиционной, поэтому она рекомендуется преимущественно для исследовательского эксперимента, и особенно при сертификационном испытании у производителя нового оборудования. Методика такой оценки основана на процедуре аттестации сварщиков, изложенной в документе НАКС — РД 03-485-02 [182]. Для того чтобы удовлетворить требования к адекватности и объективности такой модели сварочного процесса, необходимо:

- при выборе типа сварного соединения учитывать его распространность в реальных конструкциях, удобство измерения размеров шва, возможность появления и обнаружения дефектов;

- ограничивать субъективный момент на стадии собственно сварки благодаря жесткой регламентации режимов и других условий испытания;

- устранять субъективность на последующей стадии оценки качества сварки благодаря числовой характеристике размеров и формы шва, а также размеров и количества дефектов.

С целью унификации режимов сварки и методов контроля ее качества предлагаются два варианта сварных соединений: стыковое типа С17 или С18 и тавровое типа Т1.

Стыковое соединение типа С17 (сварка на весу) и С18 (сварка на съемной подкладке) с симметричным скосом обеих кромок и односторонним однопроходным швом (рис. 10.10) имеет размеры разделки кромок и готового изделия вместе с допусками, соответствующие требованиям стандартов, названных в разд. 10.2.1 [183].

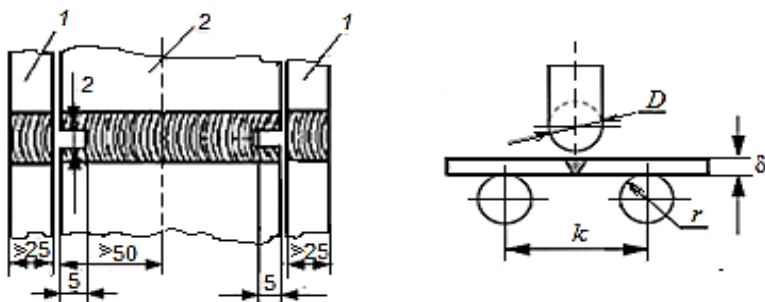


Рис. 10.10. Контрольное стыковое соединение (а) и схема его испытания на излом (б): 1 — отходы; 2 — испытательный образец ($D = 2\delta$, $r = \delta$, $k = 5\delta$)

Тавровое соединение типа Т1 без скоса кромок с односторонним однопроходным угловым швом (рис.10.11) имеет размеры, соответствующие этим же стандартам.

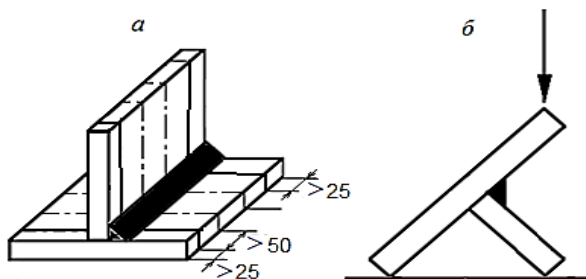


Рис. 10.11. Контрольное тавровое соединение (а) и схема его испытания на излом (б)

10.3.2. Режимы и условия сварки

Как уже отмечалось, для выделения характеристик качества, связанных именно с оборудованием, при выполнении КСС следует обеспечить одинаковые благоприятные прочие условия (квалификация, материалы, технология), например так, как это задано в ГОСТ 25616-83 (см. Введение). Условия испытания предлагается унифицировать по требованиям РД 03-485-02 и ГОСТ 25616-83. При испытании сварочного оборудования исходными параметрами режима являются не характеристики свариваемых изделий, а сварочный ток, в зависимости от которого принимают диаметр электрода и толщину заготовок КСС. Скорость подачи проволоки перед сваркой устанавливают ориентировочно, а в предварительном эксперименте подстраивают для получения принятого сварочного тока. Скорость сварки в предварительном эксперименте настраивают так, чтобы за один проход обеспечить заполнение всей разделки кромок или получить катет принятой величины.

Для ручной и механизированной сварки:

- заготовки КСС — пластины из низкоуглеродистой стали размерами 150x250 мм (при испытании на излом удаляют механическим способом начальный и конечный участки соединения вместе с кратером, но не менее 25 мм; при необходимости остальную часть сварного соединения допускается резать на образцы шириной не менее 50 мм);

- электроды по ГОСТ 9466-75 с типом покрытия, зависящим от типа источника (переменного тока — с рутиловым покрытием марок, например, АНО-4, МР-3, ОЗС-4; постоянного тока — с основным покрытием марок, например, УОНИ 13/55, ОК 53.70);

- электродная проволока по ГОСТ 2246-70, например, марки Св-08Г2С;

— защитная среда — углекислый газ по ГОСТ 8050-85 или газовая смесь, предназначенная для сварки низкоуглеродистых сталей, например, К-2 (82% Ar+18% CO₂);

— пространственное положение — нижнее (если в назначение испытываемого оборудования не включена сварка в других положениях), полярность дуги — обратная (если прямая полярность не указана в назначении оборудования);

— сварщик-испытатель квалификации не ниже 5 разряда, с опытом эксплуатации подобного оборудования;

— режимы сварки приведены в табл. 10.1 и 10.2. (например, при ручной сварке тавровых КСС источником с диапазоном настройки 90–250 А рекомендуются два режима: минимальный — $I_{св} = 100$ А, $d_0 = 3$ мм, $\delta = 6$ –8 мм, $k = 4$ –5 мм и максимальный — соответственно 220 А, 5 мм, 14–16 мм, 8–10 мм; возможен также и промежуточный режим — 150 А).

Для автоматической сварки:

— заготовки КСС — пластины из низкоуглеродистой стали размерами 200x450 мм (при испытании на излом доработка образцов в соответствии с рис. 10.10, а и 10.11, а);

— электродная проволока по ГОСТ 2246-70, например, марки Св-08, флюс по ГОСТ 52222-2004, например, марки АН-348А;

— сварка стыкового соединения С4 (без скоса кромок с гарантированным зазором) на медной подкладке (способ АФМ) или на флюсовой подушке (АФП);

— сварка таврового соединения Т1 — в угол, при токе от 500 А — в лодочку;

— режимы сварки приведены в табл. 10.3.

Для ручной аргонодуговой сварки на переменном токе:

— заготовки КСС — пластины из алюминиевого сплава типа АМг размерами 150x250 мм, обезжиренные и травленные (при испытании на излом доработка образцов по рис. 10.10, а и 10.11, а);

— присадочные прутки из алюминиевого сплава типа АМг, обезжиренные и травленные;

— вольфрамовые электроды по ГОСТ 23949-80 марки ЭВЛ;

— сварка стыкового соединения С18 на медной подкладке с канавкой, сварка таврового соединения Т1 в угол;

— сварщик-испытатель квалификации не ниже 5 разряда, с опытом эксплуатации подобного оборудования;

— режимы сварки приведены в табл. 10.4.

Таблица 10.1.

Режимы ручной сварки покрытым электродом КСС

Сварочный ток $I_{св}$, А	Диаметр электрода, $d_э$, мм	Толщина пластин для соединений С17 δ , мм	Катет шва для соединений Т1 k , мм	Толщина пластин для соединений Т1 δ , мм
60	2,0	3–4	3–4	5–6
80 100	2,5 3,0	4–6	4–6	7–8
150	4,0	6–7	6–7	9–11
220 300	5,0 6,0	7–9	7–9	12–14

Таблица 10.2.

Режимы механизированной сварки шланговым полуавтоматом КСС

Сварочный ток $I_{св}$, А	Диаметр электрода $d_э$, мм	Толщина пластин для соединений С17 δ , мм	Катет для соединений Т1 k , мм	Толщина пластин для соединений Т1 δ , мм	Сварочное напряжение $U_{св}$, В	Расход газа $Q_г$, л/мин
70	0,8	4–5	3	4–5	18	5
100	0,8	5–6	3–4	5–6	19	7
150	1,0	6–7	4–5	6–8	22	10
200	1,2	7–8	5–6	8–10	24	12
300	1,6	8–10	6–7	10–12	29	18
400	1,6	10–12	7–8	12–14	34	20
500	2,0	12–14	8–9	14–16	39	22
600	2,0	16–18	10–12	18–20	44	24

Таблица 10.3.

Режимы автоматической сварки под флюсом КСС

Сварочный ток $I_{св}$, А	Диаметр электрода $d_э$, мм	Толщина пластин для соединений С4 δ , мм	Катет для соединений Т1 k , мм	Толщина пластин для соединений Т1 δ , мм	Сварочное напряжение $U_{св}$, В
200	2	3–4	3–4	5–6	30
300	2	4–5	4–5	6–8	32
500	3	6–8	6–8	10–12	34
750	4	8–10	8–10	14–16	38
1000	5	10–12	10–12	16–20	40
1250	6	12–14	12–14	20–24	42
1600	6	14–16	14–16	24–28	44

Таблица 10.4.

Режимы ручной аргонодуговой сварки неплавящимся электродом КСС алюминия

Сварочный ток $I_{св}$, А	Диаметр электрода $d_э$, мм	Толщина пластин для соединений С18 δ , мм	Катет для соединений Т1 k , мм	Толщина пластин для соединений Т1 δ , мм	Диаметр присадки $d_{пр}$, мм	Расход газа $Q_г$, л/мин
100	2–3	4–5	3–4	4–6	2	6
200	3–4	5–6	4–5	6–8	2–3	9
300	4–5	6–7	5–6	8–10	3–4	12
400	6–7	7–8	6–7	10–12	4–5	15
500	7–8	8–10	7–8	12–14	4–5	18

10.3.3. Контроль качества

Качество КСС может проверяться визуальным, инструментальным, физическими и разрушающими методами.

Визуальный и инструментальный контроль выполняют с целью выявления следующих нарушений и дефектов:

- отступлений по размерам и форме швов от требований стандартов;
- непроваров, прожогов, наплывов, подрезов, незаполненной разделки, незаваренного кратера, грубой чешуйчатости;
- поверхностных трещин, пор и включений.

Визуальный контроль сварных швов производят по всей их протяженности с двух сторон невооруженным глазом, а затем с применением лупы 4–7-кратного увеличения. Измерительный контроль всех доступных размеров шва производят не менее чем в трех местах, расположенных равномерно по длине сварного шва, кроме крайних участков.

Ультразвуковой или радиографический контроль проводят по всей длине КСС кроме начального и конечного участков протяженностью не менее 25 мм для выявления в сварных соединениях внутренних дефектов (трещин, пор, непроваров, несплавлений, шлаковых включений). Ультразвуковой контроль производят в соответствии с ГОСТ 14782-86, радиографический — в соответствии с ГОСТ 7512-82.

Разрушающий контроль предназначен для выявления внутренних дефектов КСС. Образец для испытания стыкового КСС на излом имеет два надреза и располагается корнем шва книзу (рис. 10.10, б). Образец для испытания таврового соединения на излом по схеме рис. 10.11, б также способствует проверке не только середины, но и корня шва. Достоинство обеих схем заключается в том, что разрушение практически всегда происходит по участкам расположения самых опасных дефектов.

Комплексная оценка качества КСС должна оперировать числовыми значениями всех критериев, изначально представленных как в количественной (размеры), так и в качественной (дефекты) формах. Для этого, по правилам квалиметрии, лучше всего подходит обобщенный показатель качества формирования шва $Q_{об.ш}$, который имеет вид произведения частных показателей Q_i с учетом значимости g_i каждого из них.

$$Q_{об.ш} = \prod_{i=1}^n Q_i^{g_i}$$

Каждый частный показатель качества Q_i представляет собой отношение балльного значения одного из принятых критериев к высшему баллу — $Q_i = B_i/5$. Значимость g_i каждого показателя назначается экспертами. По принципу аддитивности сумма g_i равна 1.

Реальных примеров пользования обобщенными показателями качества КСС нам не известно. Поэтому рассмотрим процедуру разработ-

ки такого показателя. Эта проблема должна решаться коллективом экспертов — специалистов сварочного производства — по правилам стандарта ГОСТ 23554.2-81 «Экспертные методы оценки качества промышленной продукции». Эксперты должны решить следующие задачи:

— из вышеназванных критериев качества КСС (см. разд. 10.2.1) выбрать такие, чтобы их совокупность исчерпывающе отражала все аспекты качества КСС;

— выработать оценку в баллах от 0 до 5 каждого из частных показателей с характеристикой каждой оценки для однозначного и категоричного отнесения конкретного КСС только к одной из этих оценок;

— определить значимость (весовой фактор) каждого частного показателя с учетом особенностей способа сварки и влияния показателя на работоспособность подобных соединений при их эксплуатации.

Итогом работы экспертов должны стать матрицы для вычисления обобщенного показателя всех КСС. Табл. 10.5 является только макетом такой матрицы, показывающим все названия и только некоторые характеристики частных показателей, их балльные оценки и значимости.

Поясним содержание характеристик некоторых частных показателей из табл. 10.5, а также перспективы ее заполнения.

1) При определении частных показателей размеров КСС Q_1-Q_2 учтены абсолютные значения ширины шва e и выпуклостей с лицевой g и обратной g_1 стороны, а также их допустимые отклонения от номинального размера $e_{\text{ном}}$ и $g_{\text{ном}}$. Оценка 5 баллов соответствует точному соблюдению требований ГОСТ 5264-80 на ручную и 14771-76 на механизированную сварку. Предлагается снижать оценку до 3 баллов при неопасном небольшом отклонении размеров от стандартных в сторону увеличения – ширины до 2–4 мм от максимального стандартного значения, выпуклости до 3 мм абсолютного значения.

2) Некоторые дефекты КСС – непровар, прожог, трещина – недопустимы при любых размерах и формах, поэтому для них приняты только два варианта балльной оценки: 5 (нет дефекта) и 0 (есть дефект). Оценка 0 предложена потому, что благодаря среднегеометрической форме обобщенного показателя $Q_{\text{об.ш}}$ в виде *произведения* частных показателей Q_i такой дефект приводит к автоматической браковке КСС независимо от хорошей оценки остальных частных показателей ($Q_{\text{об.ш}} = 0$).

3) Пониженные оценки за неопасные дефекты заимствованы из стандартов. ГОСТ 9466-75 допускает небольшое количество мелких пор и шлаковых включений. ГОСТ 25616-83 допускает подрезы (3 балла).

4) Для решения вопроса о допустимости отдельных дефектов можно использовать ГОСТ Р ИСО 5817-2009 «Сварные соединения... Уровни качества» [236]. При этом высший уровень качества B может соответствовать оценке 5 баллов, уровень C – 4 балла, уровень D – 3 балла.

Таблица 10.5.

*Вычисление обобщенного показателя качества КСС типа С17
при ручной и механизированной сварке (макет)*

№ по- каза- теля i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Наз- вание показа- теля Q_i	Размеры шва по ГОСТ 5264-80 и 14771-76		Ровн- ость	Наружные дефекты				Внутренние дефекты		
	ширина e	выпук- лость g, g_1	$\Delta F/F_n$ %	подрез	нап- лив	не- про- вар	про- жог	трещи- ны	по- ры	шлак- овые вклю- чения
Б а л л	5	соответствуют ГОСТ		нет						
	4									
	3	$e_{ном} +$ (2–4) мм	от 2 до 3 мм	не более 3 шт глуби- ной не бо-лее 1 мм						
	2									
	1	Более $e_{ном} + 4$ мм	более 3 мм						более 3 шт на 100 мм шва разме- ром более 15 % толщины	
	0					есть				
Значи- мость показа- теля	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

Пример объективной (числовой) оценки сплошности сварного шва по количеству пор и шлаковых включений описан в работе [178]. Использовали специальные электроды ЦУ-5 диаметром 2,5 мм, предназначенные для монтажной сварки тонкостенных труб. Варьировали ток в интервале 30–180 А и длину дуги (короткая–нормальная–длинная). В качестве источника использовался сварочный выпрямитель, с помощью которого настраивался ток. Поэтому описанный эксперимент можно считать одновременно испытанием источника по критериям качества формирования шва. На пластину из стали 20 наплавлили валик шириной 6–8 мм и длиной 80 мм. Валик послойно шлифовывали через 0,3 мм (половина диаметра допустимого дефекта), протравливали и осматривали с помощью 5-кратной лупы для выявления внутренних дефектов.

На рис. 10.12 видно, что допустимое количество дефектов (3 шт) не превышает в интервале токов 60–130 А. При меньшем токе дуговой процесс прерывается короткими замыканиями в моменты капельного переноса и даже прилипаниями электрода к ванне. Это вызывает ухудшение защиты и увеличение количества шлаковых включений, очевидно экзогенного происхождения (из шлака). При токе более 130 А чрезмерно интенсивное плавление электродного и основного металла сильно турбулизирует газовую и шлаковую защиту, что приводит к усиленному порообразованию.

При изменении сварщиком длины дуги в узком интервале $\pm 1\text{--}1,5$ мм от нормальной, что обнаруживается на осциллограммах по изменению напряжения в интервале ± 2 В, не замечено отчетливой зависимости сплошности от этой длины. Тем не менее, прямая зависимость количества и размеров пор и шлаковых включений от длины и напряжения дуги существует, но проявляется она у названных электродов только при напряжении более 38 В.

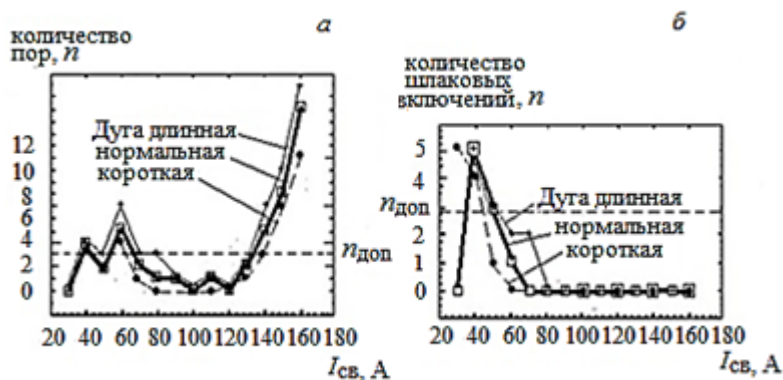


Рис. 10.12. Поры (а) и шлаковые включения (б) в шве (сталь 20, электрод ЦУ-5 Ø2,5 мм)

10.4. Управление формированием шва

10.4.1. Аргонодуговая сварка пульсирующей дугой

Сварка неплавящимся электродом с пульсацией тока первоначально разрабатывалась для соединения тонких деталей на весу. Для таких изделий самым распространенным и опасным дефектом формирования шва является прожог, что вынуждает ограничивать тепловложение в свариваемое изделие, желательно без снижения устойчивости. При сварке пульсирующей дугой эта проблема решается модулированием тока, т.е. его циклическим программным изменением [235].

Модулирование сварочного тока при аргонодуговой сварке регламентируется следующими соображениями. За время импульса на изде-

лии образуется круглая ванночка небольших размеров (диаметром от 2 до 10 мм), металл которой в течение паузы успевает закристаллизоваться или существенно остыть (рис. 10.13, *а*). Импульсы тока дозированы по амплитуде $I_{\text{и}}$ и длительности $t_{\text{и}}$ и регулярно чередуются с паузами с параметрами $I_{\text{п}}$ и $t_{\text{п}}$ (рис. 10.13, *б*). Параметры импульсов подбираются так, чтобы обеспечить полное проплавление, но без прожога изделия и без чрезмерного провисания ванночки. А параметры паузы устанавливают так, чтобы гарантировать перекрытие ванночек одна другой для получения сплошного шва и не допустить обрывов дуги. Кроме сварки тонкого металла пульсирующая дуга используется также при выполнении вертикальных, горизонтальных и потолочных швов, где четкое дозирование энергии предотвращает стекание сварочной ванны.

Иногда на низкую частоту накладывают импульсы более высокой частоты до 1 кГц, что способствует измельчению структуры шва, а этим и повышению его прочности (рис. 10.13, *в*). Двойное модулирование может использоваться и при сварке алюминиевых сплавов на переменном токе (рис. 10.13, *г*). При этом параметры импульсов низкой частоты 1–10 Гц могут назначаться для качественного формирования с приемлемой чешуйчатостью шва, а частота 50 Гц благодаря периодической смене полярности дуги обеспечивает баланс между требованиями плавления и очистки.

Требования к источнику для сварки пульсирующей дугой заключаются в следующем. Время импульса $t_{\text{и}}$ и паузы $t_{\text{п}}$ должны настраиваться плавно и независимо в интервале 0,04–2 с. Жесткость цикла $t_{\text{п}}/t_{\text{и}}$ назначают в интервале от 0,2 до 5. Ток импульса и паузы также должны настраиваться плавно и независимо. Глубина модулирования, т.е. отношение тока импульса к току паузы $I_{\text{и}}/I_{\text{п}}$, должна изменяться от 1 до 10.

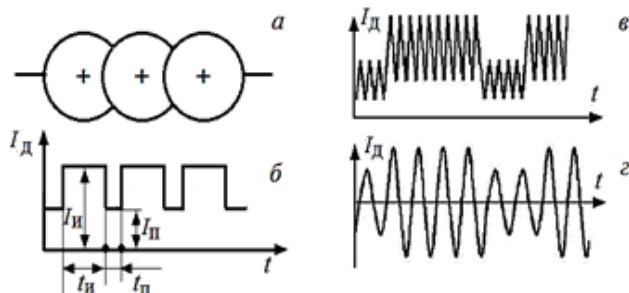


Рис. 10.13. Сварка пульсирующей дугой: *а* — вид сварного шва, *б, в, г* — схематичные осциллограммы тока

Режим можно характеризовать средним за цикл сварочным током или эффективным (среднеквадратическим) его значением:

$$I_{\text{св.ср}} = \frac{I_{\text{и}} t_{\text{и}} + I_{\text{п}} t_{\text{п}}}{t_{\text{и}} + t_{\text{п}}} \quad \text{и} \quad I_{\text{св.эфф}} = \sqrt{\frac{I_{\text{и}}^2 t_{\text{и}} + I_{\text{п}}^2 t_{\text{п}}}{t_{\text{и}} + t_{\text{п}}}}.$$

Пример оценки источника для сварки пульсирующей дугой по осциллограммам характеризует только первый этап испытания, проводимый для проверки соответствия реального процесса сварки настроенной циклограмме программного управления. Поясним результаты такой оценки выпрямителя ВДУ-506МТ при аргонодуговой сварке нержавеющей стали (рис. 10.14):

- обеспечивается регулярная смена этапов импульсов и пауз;
- значения всех параметров цикла ($I_{\text{и}}$, $I_{\text{п}}$, $t_{\text{и}}$ и $t_{\text{п}}$) соблюдаются точно;
- импульс тока имеет прямоугольную форму, благоприятную для надежного установления процесса плавления в каждом интервале импульса;
- при переходе к интервалу паузы снижается не только ток, но и напряжение — с провалом до 8 В;
- устойчивость дугового процесса, в том числе при переходе от импульса к паузе, обеспечена на всех проверенных режимах.

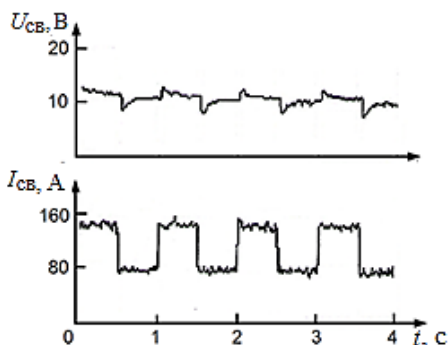


Рис. 10.14. Аргонодуговая сварка пульсирующей дугой нержавеющей стали (выпрямитель ВДУ-506МТ, ЭВЛ Ø1,6 мм, $I_{\text{и}} = 150 \text{ А}$, $I_{\text{п}} = 75 \text{ А}$, $t_{\text{и}} = t_{\text{п}} = 0,5 \text{ с}$)

На втором этапе испытания оценивалось качество сварного соединения по геометрическим параметрам шва. При сварке нержавеющей стали толщиной 4 мм стыковым швом без разделки кромок (280/140 А, 1/1 с, 10 м/ч) получены следующие размеры шва: ширина $8,5 \pm 0,5 \text{ мм}$, шаг точек $5,5 \pm 0,3 \text{ мм}$, перекрытие $62 \pm 15 \%$.

Пример оценки источника для сварки на переменном токе алюминиевого сплава пульсирующей дугой по данным работы [70] показан в табл. 10.6. Установлено, что сквозное проплавление металла малой толщины 0,2–0,8 мм без прожогов возможно только на подкладке с профилированной канавкой и с подачей присадочной проволоки диаметром 0,6–0,8 мм. Важной характеристикой качества формирования шва являются размеры обратного валика. Эти размеры при полном проплавлении совпадают с размерами канавки, задаваемыми по условию равнопрочности сварного соединения — от 0,2х1,8 до 0,5х3,5 мм.

Полнота проплавления задается выбором тока I_n в зависимости от толщины заготовок, а ток I_n , достаточный для обеспечения общей устойчивости, составляет всего 4–10 А. Поэтому источник должен обеспечивать очень высокую глубину модулирования I_n/I_n — до 35. Рациональное значение шага точек s , связанное с необходимым их перекрытием, составляет 1–1,8 мм. Специфическим и еще более важным критерием для сварки малых толщин является коробление сварного соединения. Установлено, что для его ограничения величины 0,3–0,4 мм необходимо поддерживать жесткость цикла t_n/t_n на уровне 1,5–3.

Таблица 10.6.

Сварка пульсирующей дугой сплава АМгб малой толщины

Толщина δ , мм	Параметры режима					Размеры шва, мм		
	ток им-пульса I_n , А	ток паузы I_n , А	время им-пульса t_n , с	время паузы t_n , с	скорость сварки $V_{св}$, м/час	выпуклость обратного валика g_1	ширина обратного валика e_1	шаг точек s
0,2	70	4	0,06	0,12	21,6	0,2	1,8	0,8
0,4	86	6	0,08	0,16	14,4	0,2	1,8	1
0,6	115	8	0,1	0,2	14,4	0,5	3,5	1,2
0,8	115	10	0,08	0,16	21	0,5	3,5	1,4

10.4.2. Сварка плавящимся электродом модулированным током

Такой термин применяют в отношении ручной сварки покрытым электродом и механизированной или автоматической сварки проволочным электродом с импульсным питанием, хотя по виду и длительности импульсов эти процессы близки к вышеописанному процессу аргонодуговой сварки пульсирующей дугой.

Модулирование сварочного тока при ручной сварке покрытыми электродами все же имеет свои особенности. На рис. 10.15 приведены результаты оценки устойчивости по величине минимально возможного тока паузы I_n при разной ее длительности [184]. Прежде всего, отметим, что импульсный процесс при ручной сварке покрытыми электродами менее устойчив в сравнении с аргонодуговой сваркой, где минимально возможный ток составляет всего несколько ампер.

При сравнении нескольких марок покрытых электродов видим, что наиболее устойчив процесс при сварке электродами с рутиловым покрытием МР-3 — минимально возможный ток в паузах $I_{nmin} = 15–30$ А (если $t_n \geq 0,04$ с). Ниже устойчивость при сварке электродами с основным покрытием УОНИ 13/55 — $I_{nmin} = 18–45$ А. Еще ниже устойчивость при сварке электродами с целлюлозным покрытием ВСЦ-4А — $I_{nmin} = 45–70$ А. По рис. 10.15 отметим также, что снижение устойчивости при увеличении длительности паузы происходит только до значений

$t_n = 0,04-0,2$ с. Видимо, к этому времени исчерпывается запас тепловой энергии, накопленный в дуге в течение предыдущего импульса.

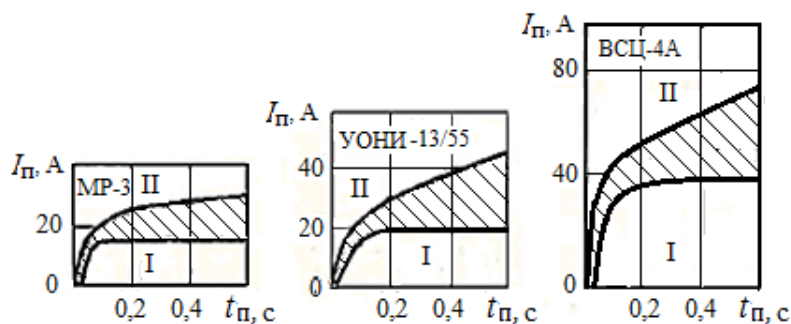


Рис. 10.15. Неустойчивый (I) и устойчивый (II) процессы ручной сварки покрытыми электродами в зависимости от тока и длительности пауз (электроды $\varnothing 4$ мм, $I_u = 160-170$ А, $t_u = 0,4$ с)

Модулирование тока может использоваться не только для стабилизации проплавления на тонком металле, но и для управления глубиной проплавления на относительно толстом металле [185]. На рис. 10.16 сравниваются методы сварки непрерывным и модулированным током. Видно, что при одинаковой величине среднего тока модулирование способствует увеличению проплавления. Это объясняется резким увеличением давления дуги в интервалах импульсов, благодаря чему ванна вытесняется в хвостовую часть, а дуга получает доступ к нижним слоям свариваемых заготовок.

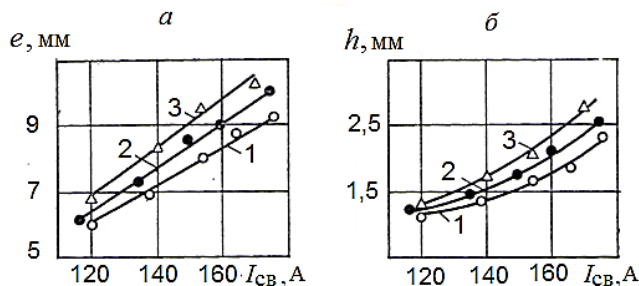


Рис. 10.16. Ширина шва (а) и глубина проплавления (б) при сварке непрерывным (1) и модулированным током (2 — $I_n = 85$ А) (3 — $I_n = 35$ А) (электрод ОЗС-4 $\varnothing 4$ мм, $t_u = 0,5$ с, $t_n = 0,2$ с)

Модулирование тока при механизированной и автоматической сварке плавящимся электродом выполняется с относительно низкой

частотой 0,5–10 Гц [186]. Такие импульсы способствуют увеличению проплавления, а также воздействуют на характер периодической кристаллизации ванны, способствуя измельчению зерна.

10.4.3. Ручная сварка с двойным модулированием тока

Гибкое двойное модулирование сварочного тока расширяет технологические возможности ручной сварки, поскольку совмещает функции управления как формированием шва, так и переносом электродного металла.

Принцип гибкого управления сварочным током [178]. В отличие от программных систем с жестким управлением, где длительности импульса и паузы задаются заранее и поддерживаются при сварке неизменными, здесь регулятор переключается от импульса к паузе и обратно автоматически в ответ на манипуляции электродом со стороны сварщика (рис.10.17). В свою очередь, сварщик управляет движениями электрода в зависимости от размеров и состояния сварочной ванны.

При сварке неповоротного кольцевого стыка сварщику пришлось бы несколько раз менять режим при сменах пространственного положения. Иное дело при гибком управлении. Начало сварки в верхней части стыка (нижнее пространственное положение шва) можно выполнять на высоком токе без пауз. При переходе к наклонному, и тем более к вертикальному участку сварщик обнаруживает признаки приближающегося стекания ванны и поэтому удлиняет дугу. Вызванное этим увеличение напряжения дуги система управления воспринимает как команду на переход к паузе и поэтому уменьшает ток. После затвердевания или, по крайней мере, уменьшения размеров жидкой ванны сварщик снова укорачивает дугу, тем самым давая команду на восстановление импульса. И далее сварщик, удаляя и приближая электрод к ванне при непрерывно горящей дуге, управляет тепловложением в ванну в зависимости от ее размеров и температуры.

Дополнительно к гибкому программному управлению в описываемой системе введено двойное модулирование сварочного тока. Причем основные импульсы низкой частоты 0,1–1 Гц предназначены для управления формированием шва, как это уже пояснено выше. А дополнительные импульсы средней частоты 50–120 Гц подаются в интервалах основных пауз, и этим повышают устойчивость процесса и обеспечивают регулярный перенос электродного металла и физиологический комфорт зрению сварщика.

На рис. 10.17 показана типовая циклограмма процесса сварки с обозначениями всех параметров. По ней поясним принципы оптимизации процесса сварки с гибким двойным модулированием:

— длительности основного импульса $t_{и.осн}$ и основной паузы $t_{п.осн}$ не настраиваются, переход от импульса к паузе происходит автоматически по сигналу $U_d + 2$ В, а от паузы к импульсу — по сигналу $U_d - 2$ В, что соответствует изменению длины дуги сварщиком приблизительно на $\pm 1-1,5$ мм;

— ток основного импульса $I_{и.осн}$ настраивается в 1,5–1,8 раза выше нормального для используемого электрода (ЦУ-5 и ЦЛ-39 Ø 2,5 мм — 120–140 А; УОНИ 13/55 Ø 3 мм — 170–180 А);

— ток основной паузы $I_{п.осн}$ соответствует минимально возможному току устойчивого горения дуги (для названных электродов 30–40 А);

— ток дополнительных импульсов, действующих в интервале основной паузы, назначают одинаковым с током основного импульса ($I_{и.доп} = I_{и.осн}$);

— длительность дополнительных импульсов должна быть достаточной для сбрасывания капли при ее коротком замыкании на ванну (для вышеприведенных электродов $t_{и.доп} = 2-7$ мс);

— частота дополнительных импульсов должна соответствовать образованию мелких капель ($f_{и.доп} = 50-60$ Гц), а также снижать зрительную утомляемость сварщика — при такой частоте зрачок человеческого глаза перестает реагировать на изменения яркости дуги в интервалах основной паузы.

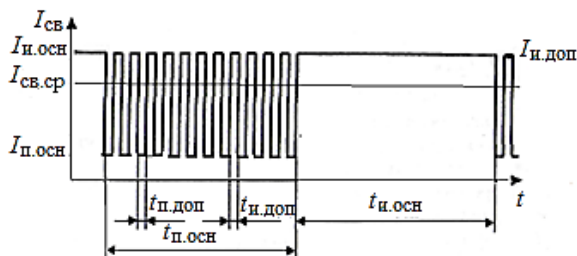


Рис. 10.17. Циклограмма двойного модулирования тока при ручной сварке

Пример оценки формирования шва был выполнен в работе [187] при испытании сварочно-технологических свойств электродов УОНИ 13/55 в разных пространственных положениях. Но эти же данные можно использовать для оценки некоторых сварочных свойств оборудования, поскольку варьирование импульсных характеристик режима выполнялось именно настройкой параметров модулятора, входящего в состав источника. Важным критерием качества формирования сварного шва является его сплошность, оцениваемая по количеству и размерам внутренних дефектов — пор и шлаковых включений. Методика оценки сплошности по ГОСТ 9466-75 включала в себя сварку таврового соединения одним угловым швом и его разрушение для обнаружения в изломе дефектов (см. рис. 10.11).

Была поставлена задача по уточнению параметров дополнительных импульсов в паузе — $t_{и.доп}$ и $f_{и.доп}$. Поэтому для обеспечения чистоты эксперимента сварка выполнялась без основных импульсов ($t_{и.осн} = 0$). На рис. 10.18 приведены характеристики сплошности при сварке таврового соединения в вертикальном положении с варьированием параметров дополнительных импульсов.

Видно, что с увеличением длительности дополнительных импульсов $t_{и.доп}$ сплошность непрерывно улучшается, а при $t_{и.доп} > 7$ мс дефекты исчезают почти полностью. Это объясняется следующим образом. Перенос электродного металла в интервалах основных пауз происходит с короткими замыканиями капли на ванну. При отсутствии в этом интервале дополнительных импульсов или их малой длительности короткие замыкания затягиваются, что приводит к ухудшению газовой и шлаковой защиты шва. Но при достаточно большой длительности $t_{и.доп}$ короткое замыкание прерывается принудительно, подобно тому как это делается при форсировании дуги (см. разд. 9.4). При использовании электродов УОНИ 13/55 диаметром 3 мм в разных пространственных положениях для устранения дефектов сплошности достаточны значения $t_{и.доп}$ от 5 до 7 мс. При увеличении частоты дополнительных импульсов сплошность шва улучшается. Однако увеличение частоты до 120 Гц вызывает существенное увеличение среднего тока основной паузы, что приводит к снижению эффекта модулирования для управления формированием шва. Поэтому достаточным признано значение $f_{и.доп} = 50\text{--}60$ Гц.

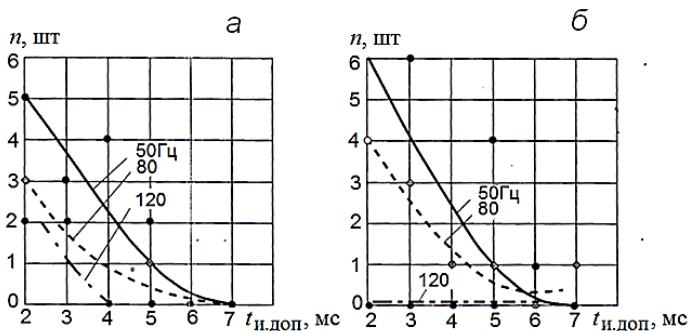


Рис. 10.18. Зависимость количества пор (а) и шлаковых включений (б) на 100 мм шва от длительности $t_{и.доп}$ и частоты ($f_{и.доп} = 50, 80$ и 120 Гц) дополнительных импульсов (электрод УОНИ 13/55 \varnothing 3 мм, $I_{и.доп} = 170\text{--}180$ А, $I_{н.доп} = 30$ А)

10.4.4 Орбитальная сварка

Таким термином объединяют несколько методов автоматической дуговой сварки неповоротных стыков труб. Общим для них является вращение сварочного автомата вокруг стыка двух неподвижных труб. Тонкостенные трубы соединяют способом аргонодуговой сварки неплавящимся электродом, как правило, за один проход при вращении автомата на один полный оборот (рис.10.19, а). Многослойная сварка за не-

сколько проходов с подачей присадочной проволоки востребована гораздо реже. Обычно сварка начинается в верхней точке стыка и последовательно проходит пространственные положения: нижнее, вертикальное на спуск, потолочное, вертикальное на подъем и снова нижнее с полным замыканием стыка или его небольшим перекрытием. В вертикальном и потолочном положениях погонную энергию q от 100 % в нижнем положении снижают для предотвращения стекания ванны. Погонную энергию также снижают к концу сварки для предотвращения перегрева основного металла. А чтобы глубина проплавления при этом не уменьшилась, сварку выполняют пульсирующей дугой [217]. Наибольший эффект от импульсной подачи энергии достигается при сварке в потолочном положении, где особой формы пиковый импульс обеспечивает получение шва с гарантированной выпуклостью обратной стороны. Но при сварке на низких токах ванна хорошо удерживается в стыке, и в программном изменении режима процесс не нуждается.

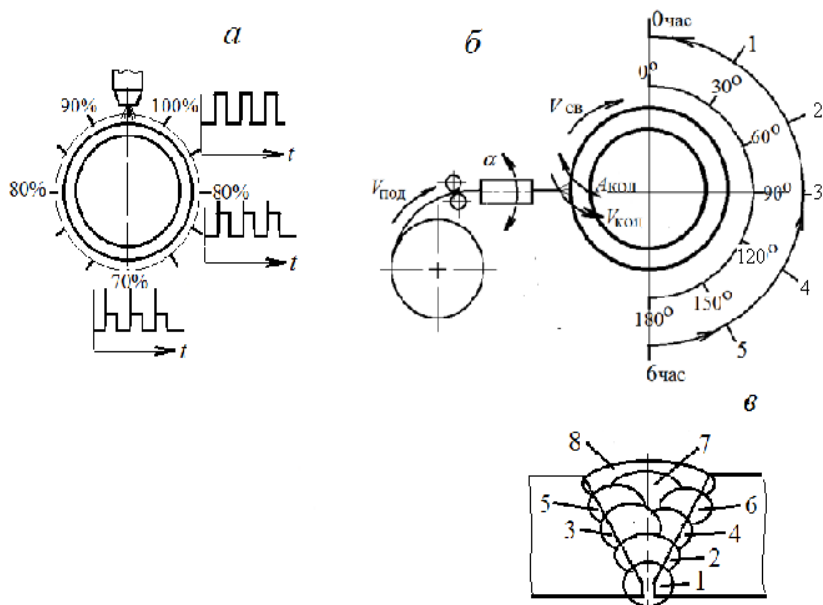


Рис.10.19 Орбитальная сварка труб: а — аргодуговая неплавящимся электродом, б — плавящимся электродом, в — раскладка проходов по разделке.

Иное дело, сварка толстостенных труб большого диаметра с толщиной стенки от 10 до 48 мм, например, при монтаже магистральных нефте- и газопроводов. Здесь обычно применяют способ сварки плавя-

щимся электродом в защитном газе в несколько проходов. На одном стыке могут использоваться два аппарата, поочередно или одновременно выполняющих круговое движение по пол-оборота на подъем или на спуск с небольшим перекрытием проходов (рис. 10.19, б). При сварке на спуск с переходом от нижнего пространственного положения к вертикальному и потолочному погонная энергия процесса постепенно снижается, при сварке на подъем — повышается. Программное изменение тока или скорости выполняется в функции угла поворота аппарата от 0 до 180–190° или в функции соответствующих этому углу делений часового циферблата — от 0 до 6–6,5 час. Программное управление для разных проходов или слоев может изменяться в зависимости от назначения прохода и необходимого для него режима (рис. 10.19, в). К корневому проходу (1) предъявляется требование полного провара с гарантированной выпуклостью обратной стороны. Следующий за ним без перерыва «горячий» проход (2) выполняется с большей погонной энергией, чтобы снизить уровень остаточных сварочных напряжений в наиболее ответственном корневом проходе. Затем идут заполняющие проходы (3 и далее в зависимости от толщины стенки трубы). Корректирующий проход (здесь 7) необходим для выравнивания площади сечения шва, особенно на вертикальном и потолочном участках. Отделочный проход (здесь 8) выполняют при высоком сварочном напряжении или с поперечными колебаниями электрода для получения широкого валика с гладкой наружной поверхностью и достаточной выпуклостью.

Пример выбора режимов сварки магистральных трубопроводов приведен в табл. 10.7 [215]. Стыковое соединение типа С17 по ГОСТ 14771-76 на трубе с толщиной стенки 14 мм сваривается за 8 проходов (рис. 10.19, в).

Первый (корневой) проход выполняется сплошной проволокой в углекислом газе с управляемым переносом капель по методу У КП [216]. Благодаря использованию CO_2 предупреждается непровар и гарантируется требуемая по ГОСТ выпуклость обратной стороны шва до 2 мм. Управляемый перенос обеспечивается инверторным источником марки ДС-400.33 на IGBT-модулях с МПУправлением. Такой перенос повышает устойчивость процесса и стабильность параметров режима, а также успокаивает сварочную ванну в любых пространственных положениях и снижает разбрызгивание. Следующие проходы выполняются самозащитной порошковой проволокой. Благодаря этому обеспечивается хорошее смачивание и растекание шва в разделке, а поэтому гладкая поверхность и высокие прочность и пластичность металла шва.

Как видно в табл. 10.7, установка УАСТ-1 обеспечивает программное МПУправление следующими параметрами:

- сварочным током как на макроуровне (за счет изменения скорости подачи на разных проходах, разных участках шва и разных этапах процесса), так и на микроуровне (посредством управления переносом);
- скоростью сварки для согласованного с током изменения погонной энергии;
- углом наклона электрода по или против направления сварки;

— амплитудой, скоростью и длительностью задержки у краев поперечных колебаний электрода.

Высокая эффективность такого оборудования с программным МПУправлением орбитальной сваркой подтверждена длительным опытом его эксплуатации при монтаже магистральных трубопроводов в зимних условиях — 95% всех стыков не имеют замечаний по итогам ультразвуковой дефектоскопии.

Таблица 10.7

Режимы орбитальной сварки труб (установка УАСТ-1, инверторный источник ДС 400.33-УКП) [215]

№ прохода Назначение прохода		1	2	3	7	8
		корневой	горячий	заполняющий	корректирующий	облицовочный
Проволока		сплошная L-56Ø1,14 мм + CO ₂	Самозащитная порошковая NR-208-XP Ø2 мм			
Сварочное напряжение, В			18-19			
Сварочный ток, А		$I_6 = 40-50$ $I_{\max} = 230-250$	200–210	230–240		200–210
Скорость подачи проволоки $V_{\text{под}}$, м/мин	0–5ч	(2,4–2,7 при 0–1ч) (3,0–3,3 при 1–6ч)	1,8	2,16	2,16	1,8
	5–6ч		1,44	1,68	–	1,44
Скорость сварки $V_{\text{св}}$, м/ч	0–2ч	≤18	10,8	9,4	–	10,8
	2–4ч		13,0	11,5	12,2	12,2
	4–6ч		10,8	10,1	–	10,8
	5–6		6,5	5,8	–	5,8
Угол наклона горелки α , град	0–3	(± 15 при 0–6ч)	10 (назад)			
	3–5		0			
	5–6		10 (вперед)	–	10(вперед)	
Амплитуда колебаний горелки $A_{\text{кол}}$, мм		0–4	по ширине раз- делки		6	12

Прочие параметры : постоянный ток, обратная полярность, сварка на спуск, вылет электрода — 12–19 мм, скорость колебаний электрода $V_{\text{кол}} \leq 26$ мм/с, задержка на краях — 0,2–0,6 с.

10.4.5. Сварка разнополярными импульсами

Генерирование разнополярных импульсов обычно выполняется полупроводниковым коммутатором, периодически изменяющим направление тока в дуге (рис. 10.20). Сначала этот метод разрабатывался для

соединения алюминиевых сплавов неплавящимся электродом в аргоне вместо сварки на переменном токе. Так же в такте прямой полярности (– на вольфрамовом электроде, + на алюминиевом изделии) происходит более интенсивное плавление основного металла, а в такте обратной полярности (+ на электроде) идет катодная очистка поверхности изделия от оксидов. Настройка тока прямой $I_{пр}$ и обратной $I_{обр}$ полярности обычно осуществляется плавно и независимо друг от друга. Как правило, ток обратной полярности устанавливают небольшим, но достаточным для удаления оксидной пленки, в зависимости от чистоты поверхности свариваемых деталей. А ток прямой полярности настраивают в зависимости от толщины изделия и диаметра электрода, он может превышать ток обратной полярности в 1,5–4 раза. Длительность тактов обратной $t_{обр}$ и прямой $t_{пр}$ полярности настраивается отдельно в диапазоне от 1 до 20 мс. Таким образом, источник разнополярных импульсов обеспечивает различный уровень нагрева свариваемого изделия в двух тактах: в такте обратной полярности снижая, а в такте прямой полярности повышая тепловложение для обеспечения необходимого проплавления и высокой производительности.

Для повышения надежности начального зажигания сварку обычно начинают на постоянном токе. Специальная функция «предварительный нагрев электрода» заключается в начале сварки сравнительно длительным тактом обратной полярности (15–120 мс).

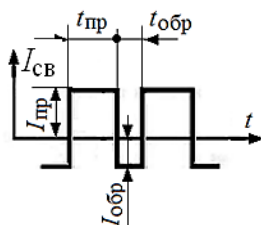


Рис.10.20. Схематичная осциллограмма тока при аргонодуговой сварке разнополярными импульсами

С технологической точки зрения оправдано пользование другими, связанными с вышеназванными характеристиками режима — частотой $f = 1/(t_{пр} + t_{обр})$ и коэффициентом асимметрии цикла по времени, т.е. отношением $k_{ас.в} = t_{обр}/(t_{пр} + t_{обр})$ [188]. Для технологически более значимого параметра $k_{ас.в}$ оптимальный диапазон находится в интервале 0,2–0,38. Ниже этих значений не гарантируется достаточное качество очистки, а выше — заметно снижается стойкость вольфрамового электрода. Частота — это параметр менее критичный, она может назначаться от 20 до 300 Гц. Более высокая частота 200–300 Гц рекомендуется при сварке малоампер-

ной дугой (до 25 А) металла толщиной менее 1 мм, поскольку увеличение частоты ограничивает блуждание дуги и повышает ее пространственную устойчивость. Наиболее распространена прямоугольная форма импульсов (*square wave*), поскольку резкое изменение направления тока при смене полярности способствует увеличению и стабилизации глубины проплавления. К тому же при скорости нарастания напряжения более 100 кВ/с не нужен импульсный стабилизатор для повторного зажигания дуги. Если нет необходимости в большой глубине проплавления, можно использовать разнополярные импульсы синусоидальной или треугольной формы. Но при этом технологические возможности источника снижаются до уровня, достижимого у более простых источников переменного тока.

Пример оценки размеров шва на алюминии выполнен в работе [70] (рис.10.21). Сравнивались три источника с одинаковой частотой переменного тока $f = 50$ Гц, но с разными значениями коэффициента амплитуды тока: $k_{aI} = 1$ (источник разнополярных импульсов), $k_{aI} = 1,41$ (источник синусоидального тока), и $k_{aI} = 1,73$ (искаженная синусоида с медленным нарастанием тока). Для всех источников отмечено монотонное увеличение глубины проплавления h и ширины шва e при увеличении мощности источника, фактически — при увеличении среднего тока.

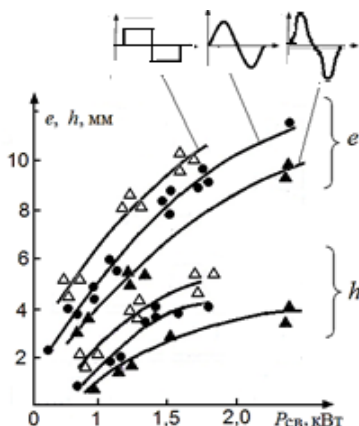


Рис. 10.21. Зависимость размеров шва от вида кривой сварочного тока: разнополярные импульсы, синусоида, искаженная синусоида (алюминий, $l_0 = 1,5$ мм, $Q_z = 5$ л/мин, $V_{св} = 15$ м/ч)

Более важным результатом является установление зависимости размеров шва от коэффициента k_{aI} при одинаковой мощности дуги. При сварке разнополярными импульсами оба размера в 1,35–1,45 раза больше, чем у источника с естественно искаженным синусоидальным током. Этот факт по результатам изучения теплового баланса дуги объясняется разным тепловложением в основной металл — КПД проплавления $\eta_{пр}$ для этих источников соответственно 0,055 и 0,04.

Гибкое программное управление разнополярными импульсами в отличие от вышеописанного жесткого управления допускает изменение параметров цикла по ходу сварки в зависимости от изменения технологической ситуации. Одна из таких гибких систем управления источником обеспечивает выполнение функции «динамический контроль окисленности» (*D.O.C. — dynamic oxide control*) (*Migatronic*, Дания) [189]. В ней автоматический регулятор изменяет длительность интервала прямой полярности в зависимости от состояния поверхности изделия (рис. 10.22).

В исходном состоянии интервалы прямой и обратной полярности чередуются регулярно при заданной амплитуде и длительности импульсов. Срабатывание функции *D.O.C.* происходит только по сигналу датчика напряжения обратной полярности. Предположим, в момент t_1 начинается такт обратной полярности. Если ранее изделие было хорошо очищено от легкоионизируемой пленки Al_2O_3 , то дуга в интервале обратной полярности не зажжется. Через 0,1 мс в момент t_2 датчик напряжения обнаружит высокое напряжение холостого хода U_x вместо $U_{обр}$ и даст команду на внеочередное включение импульса прямой полярности. Таким образом, при сварке чистого металла длительность интервалов прямой полярности увеличивается, а импульс обратной полярности возникает только при необходимости, т. е. при подходе к недостаточно чистому участку. В результате увеличивается проплавление и повышается скорость сварки, а также снижается износ электрода.

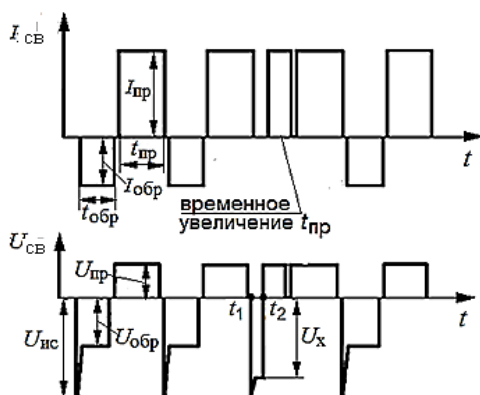


Рис. 10.22. Схематическая осциллограмма системы динамического контроля окисленности

Автоматическая сварка под флюсом разнополярными импульсами обладает возможностями перераспределения теплоты между электродом и изделием. В инверторном источнике *Power Wave AC/DC 1000*

(Lincoln Electric) системой управления *Waveform Control* сформированы прямоугольные импульсы тока с возможностью настройки следующих характеристик (рис. 10.23) [190]:

— баланс длительностей тактов обратной и прямой полярности $t_{обр}/(t_{обр} + t_{пр})$ настраивается от 0 до 100 %, причем с увеличением этого отношения растет площадь и глубина проплавления (так, на рис. 10.23, *а* видно, что из трех макрошлифов наиболее значительное проплавление наблюдается на левом при балансе 70 % DC+, т.е. в цикле, состоящем на 70 % из такта обратной полярности);

— сдвиг графика тока вверх приводит к увеличению тока обратной полярности $I_{обр}$ и увеличению глубины проплавления (рис. 10.23, *б*), сдвиг может настраиваться в интервале от + 25 % до – 25 %.

— частота импульсов устанавливается от 10 до 100 Гц (настройка частоты рекомендуется для управления формой валика при сварке с глубоким проплавлением, а также при сварке тонколистового металла).

Дополнительные возможности предоставляет система управления при наплавке, поскольку с помощью этой системы становится возможным управлять долей участия электродного металла в металле шва. К тому же описанными выше приемами удастся регулировать и производительность наплавки.

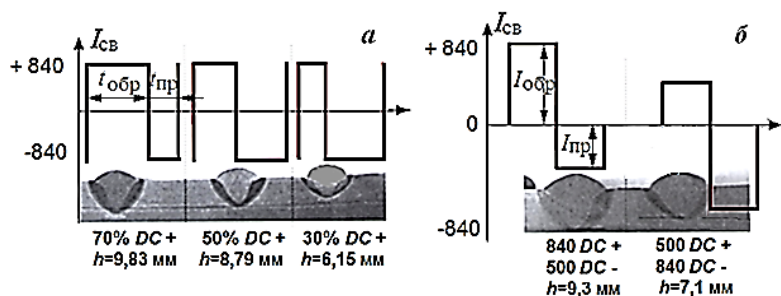


Рис. 10.23. Схематичные осциллограммы тока и соответствующие им макрошлифы наплавки при изменении баланса (*а*) и сдвига (*б*). (инверторный источник Power Wave AC/DC 1000, наплавка под флюсом, проволока Ø4,8 мм)

11. АВТОМАТИЗАЦИЯ ИСПЫТАНИЙ СВАРОЧНЫХ СВОЙСТВ

11.1. Сварочное оборудование как объект автоматического контроля

Внедрение автоматизированных информационно-измерительных систем становится насущной необходимостью при организации массовых испытаний сварочного оборудования. Практическая проверка сварочных свойств как заключительная стадия предусмотрена в процедуре сертификационных и аттестационных испытаний.

В соответствии с документом Национального Агентства Контроля Сварки РД 03-614-03 [13] специальным (3 этап) и практическим испытаниям подлежат все экземпляры аттестуемого оборудования у потребителя и по крайней мере два экземпляра, но не менее 5 % от каждой партии у производителя такого оборудования. Если учесть необходимость оценки каждого из 5 критериев сварочных свойств для источников, и до 10 показателей для другого сварочного оборудования, к тому же каждого на нескольких режимах, то становится понятным большой объем и трудоемкость даже рядового испытания. Еще более значителен объем испытаний с применением предложенных в данной работе нестандартных, но более информативных критериев оценки сварочных свойств.

Автоматизированные системы научных исследований (АСНИ) в виде аппаратно-программных комплексов предназначены как для математического планирования и проведения эксперимента, так и для обработки его результатов и создания математической модели исследуемого объекта. Поэтому их внедрение представляет собой новый шаг в проектировании и совершенствовании сварочного оборудования. Исследовательские испытания предполагают сравнение показателей сварочных свойств разных марок оборудования при варьировании их электрических характеристик. Например, для источников — это напряжение холостого хода, наклон внешних характеристик, индуктивность дросселя и т.д. А при испытании другого оборудования — это параметры разгона, стабилизации и останова приводов подачи проволоки и перемещения аппарата, напряжение импульсного стабилизатора и осциллятора, параметры устройства ограничения напряжения холостого хода, характеристики газовой аппаратуры и т.д. Подбирают также временные и амплитудные параметры циклограмм и специальных функций (горячий и мягкий пуск, форсирование дуги, параметры импульсов при управлении переносом и формированием шва). Регистрация и обработка таких

экспериментальных данных затруднительны из-за многочисленности, несмотря на их относительную однотипность.

Приведенные факты убеждают в *необходимости* внедрения автоматизированных систем сбора и обработки информации при оценке сварочных свойств с целью повышения производительности и качества испытаний. Сложней решение вопроса о *возможности* такой автоматизации с позиций технической осуществимости и экономичности. Очевидно, что наиболее информативны и легки в определении два электрических параметра — сварочные ток и напряжение — с формой их фиксирования в виде осциллограмм. Ограниченное применение находит регистрация скорости подачи и перемещения по осциллограммам тахометра или датчика ЭДС коллекторного двигателя. Еще реже используется автоматическая регистрация геометрических параметров процесса (длина дуги, размер капли), а также сварочной ванны и шва (глубина кратера, длина ванны, глубина проплавления и ширина шва). В практике исследовательских испытаний достигнуты определенные успехи по 3D-мониторингу размеров сварочной ванны и внешних очертаний шва с использованием скоростной видеокамеры и сканирующего лазера [179]. Но широкое использование видеосъемки сварочного процесса при рядовых испытаниях оборудования с целью автоматического распознавания размеров вышеназванных параметров шва пока еще не реально. Поэтому далее обсуждаются только проблемы автоматизированной регистрации и обработки осциллограмм.

Сварочные свойства, оцениваемые по критериям, определяемым на осциллограммах тока и напряжения, приведены ниже. В совокупности они представляют собой минимальный набор, экономически оправданный при массовых практических испытаниях типового сварочного оборудования (в скобках указаны алгоритмы их идентификации). Это:

- надежность начального зажигания, оцениваемая по количеству касаний $N_{\text{кас}}$, а для механизированной и автоматической сварки — по числу обрывов $N_{\text{обр}}$ до установления дуги ($I_{\text{св}} > 10 \text{ A}$, $U_{\text{св}} > 10 \text{ B}$);

- устойчивость сварочного процесса — по частоте недопустимых нарушений $n_{\text{обр}}$ при расплавлении одного электрода или образовании однопроходного шва, т.е. по количеству обрывов дуги ($I_{\text{св}} < 10 \text{ A}$, $U_{\text{св}} = U_x$, $t > 0,3 \text{ с}$) и прилипаний электрода ($I_{\text{св}} > 10 \text{ A}$, $U_{\text{св}} < 10 \text{ B}$, $t > 0,3 \text{ с}$);

- эластичность дуги — по напряжению обрыва при плавном удлинении дуги $U_{\text{об}}$;

- стабильность сварочного тока в установившемся процессе — по коэффициенту вариации $k_{vI_{\text{св}}}$, т.е. отношению среднеквадратического отклонения тока $\sigma_{I_{\text{св}}}$ к среднему значению $I_{\text{св.ср}}$;

— стабильность сварочного напряжения в установившемся процессе механизированной и автоматической сварки — по коэффициенту вариации $k_{vU_{св}}$;

— интенсивность переноса электродного металла при сварке с технологическими короткими замыканиями — по длительности $t_{кк}$ коротких замыканий каплями ($I_{св} > 10 \text{ A}$, $U_{св} < 10 \text{ В}$, $t > 1 \text{ мс}$);

— регулярность переноса при механизированной сварке короткой дугой — по коэффициенту вариации частоты коротких замыканий каплями $k_{vfkк}$ ($I_{св} > 10 \text{ A}$, $U_{св} < 10 \text{ В}$, $t > 1 \text{ мс}$).

Для оборудования с программным управлением по осциллограммам также можно оценить следующие свойства:

— параметры цикла процесса (амплитуды и длительности всех этапов — горячего пуска, заварки кратера, ограничения напряжения холостого хода и т.д.);

— параметры микроциклов импульсно-дуговой сварки и сварки пульсирующей дугой с определением амплитуд и длительностей импульсов и пауз;

— характеристики разгона и останова приводов подачи и перемещения при дополнительном осциллографировании частоты вращения двигателей этих приводов.

11.2. Автоматизация электротехнического эксперимента

Электротехнический (не сварочный) эксперимент полезно автоматизировать при массовых испытаниях сварочного оборудования с большим количеством однотипных измерений тока и напряжения. Такой эксперимент удобно выполнять без использования дуги, потому что она является нелинейной электрической нагрузкой и обычно сопровождается многочисленными возмущениями, затрудняющими анализ статических и динамических свойств собственно источника. В качестве нагрузки вместо дуги, реализуя принцип имитационного моделирования, обычно применяют балластный реостат — мощный линейный резистор с переменным активным сопротивлением.

Для пояснения процедуры имитационного моделирования рассмотрим функциональную схему автоматизированного рабочего места контролера АРМК, используемого на заводе-производителе сварочного оборудования для экспресс-оценки выпускаемой продукции [191]. На схеме АРМК (рис. 11.1) изображены:

— испытываемый источник ИСТ;

— балластный реостат УБР, управляемый по величине сопротивления и длительности включения во внешнюю цепь источника;

— коммутационный блок КБ, передающий сигналы управления к источнику и балластному реостату;

— блок технологического интерфейса БТИ, преобразующий сигналы аналоговых датчиков сварочных тока $I_{св}$ и напряжения $U_{св}$ в цифровую форму и нормирующий этот сигнал в масштабирующей схеме МС;

— устройство связи с объектом УСО, имеющее несколько входов для приема измерительной информации и несколько выходов для передачи команд к объекту — ИСТ и УБР, а также к внешним устройствам (здесь в качестве УСО используется программно-аппаратный комплекс *MacLab*, работающий в программной среде компьютеров *Macintosh*, и выполняющий функции ввода, хранения, обработки и представления результатов измерения сварочных тока и напряжения);

— персональный компьютер ПК с принтером ПР для визуального наблюдения результатов в табличной и графической формах, а также для документирования результатов испытания источника;

— модем МОД для передачи данных в сеть контроля качества предприятия.

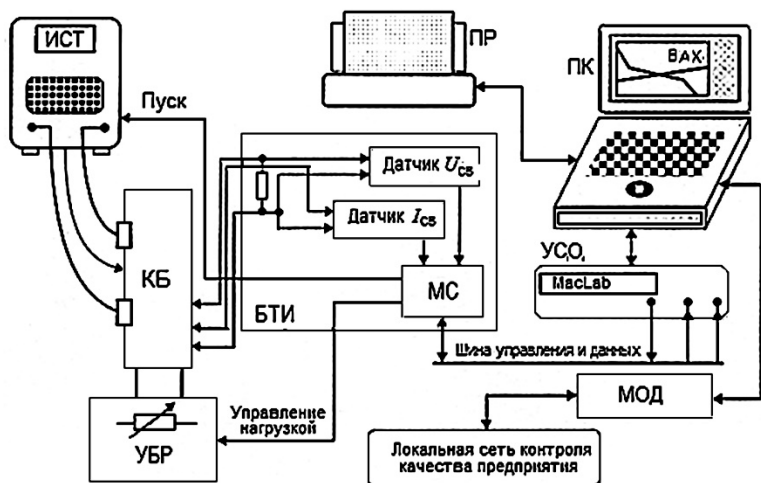


Рис. 11.1. Автоматизированное рабочее место контролера для испытания источников [191]

АРМК работает следующим образом. По команде «Пуск» к источнику ИСТ с помощью блока КБ подключается реостат УБР и запускается программа тестирования. По команде «Управление нагрузкой» контролером или программой управления последовательно изменяется сопротивление УБР. В каждом цикле изменения нагрузки производится измерение тока и напряжения аналоговыми датчиками, преобразование результатов в цифровую форму и передача в память компьютера. После окончания измерений их результаты обрабатываются с помощью УСО и ПК.

Итогом эксперимента по снятию статических внешних характеристик (ВАХ) является график, представляющий собой совокупность значений $I_{св}$ и $U_{св}$, полученных при постепенном изменении сопротивления УБР – от режима холостого хода к нагрузке и короткому замыканию. Динамические характеристики сварочного оборудования получаются на графиках переходных процессов $I_{св}(t)$ и $U_{св}(t)$ при быстрых переключениях режимов «холостой ход–нагрузка–короткое замыкание» или в другом порядке следования этих режимов.

Подобное АРМК разработано и для испытания сварочного оборудования в технологическом (сварочном) эксперименте [193].

Измеритель статических внешних характеристик AWS-024 (рис. 11.2) предназначен для измерения, запоминания и передачи на ЭВМ вольт-амперных характеристик (ВАХ) источников на ток до 500 А [192]. ВАХ измеряется на активной нагрузке — охлаждаемом балластном реостате — с линейно изменяемым сопротивлением от 4 Ом до 0 (короткое замыкание) с шагом 0,02 Ом. Переключения нагрузки выполняются электронными ключами под управлением микроконтроллера, так что снятие одной ВАХ завершается за 10 с.

Испытываемый источник подключается к измерителю сварочными проводами с быстродействующими разъемами. С помощью двухканального АЦП измеряются ток и напряжение и передаются в ЭВМ по интерфейсу RS-232 или на переносное запоминающее устройство на 128 записей ВАХ. Для отображения ВАХ на экране ЭВМ (рис. 11.2, б) разработано специальное программное обеспечение, адаптированное с ОС WINDOWS 98/2000 XT.

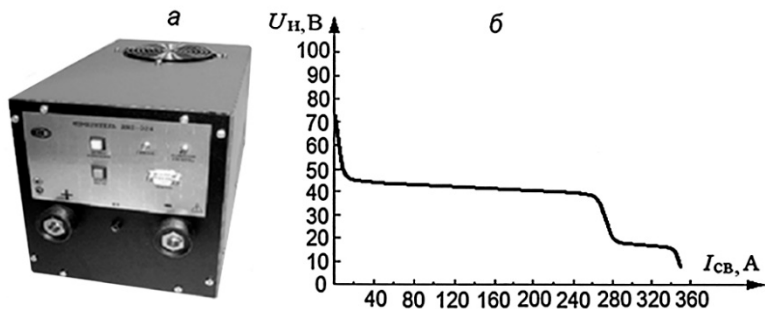


Рис. 11.2. Измеритель AWS-024: а — внешний вид, б — результат измерения ВАХ инверторного источника DC-250

11.3. Автоматизированная регистрация экспериментальных данных

Функциональная схема цифрового измерительного регистратора, микропроцессорного устройства, предназначенного для динамических измерений, записи, хранения и первичного анализа быстро изменяю-

щихся электрических величин, приведена на рис. 11.3. Регистратор может снабжаться датчиками сварочного тока ДТ, напряжения ДН, скорости сварки ДС и других параметров. Коммутатор К поочередно опрашивает эти входы. Далее каждый сигнал усиливается или ослабляется в масштабирующем устройстве МУ, освобождается от помех в фильтре нижних частот ФНЧ, дискретизируется на временные интервалы в устройстве выборки и хранения УВХ, принимает форму двоичного кода в аналого-цифровом преобразователе АЦП, поступает на хранение в оперативное запоминающее устройство ОЗУ и, наконец, приходит на экран индикатора И уже в десятичной форме.

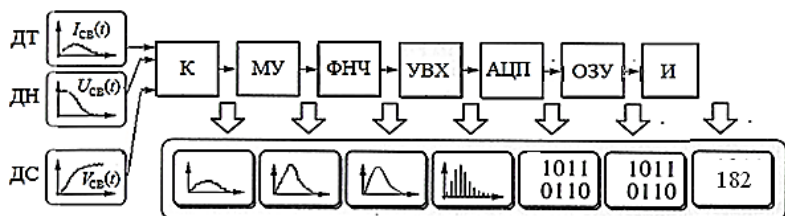


Рис. 11.3. Цифровой регистратор

При испытании сварочного оборудования используются как универсальные многоканальные запоминающие осциллографы, так и специализированные регистраторы сварочных процессов. Электроннолучевые осциллографы уступают таким цифровым устройствам практически по всем характеристикам и поэтому перестают использоваться.

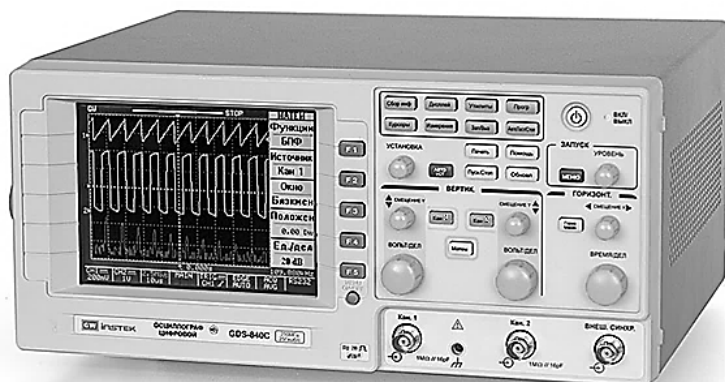
Метрологические характеристики цифровых регистраторов по математической форме близки к характеристикам описанных в разд. 6.1.3 цифровых приборов для статических измерений (разрядность, разрешающая способность и др.), но шире их, в частности благодаря большому объему памяти у цифровых регистраторов. Специфические характеристики регистраторов — это шаг и интервал.

Шаг дискретизации принимается в зависимости от частоты измеряемого сигнала и сложности профиля его изменения во времени. При воспроизведении дискретного сигнала на экране индикатора он кажется непрерывным при расстоянии между точками менее 0,5 мм. Но компьютерная обработка параметров импульсов сварочного тока и напряжения обычно нуждается в более частой дискретизации. Так, на рис. 6.3, а приведена запись, выполненная с высокой скоростью с шагом дискретизации 0,4 мс. При количестве точек на одно деление экрана 25 цена деления — 10 мс/дел.

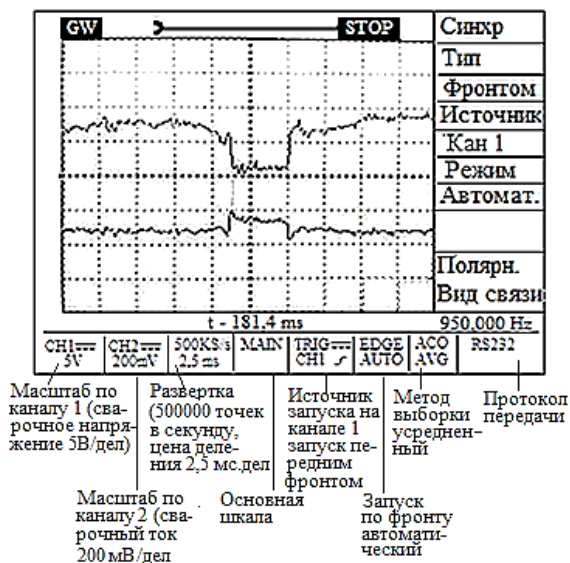
Интервал регистрации принимается с учетом объема выделенной памяти и может ограничиться интересующим фрагментом или полной длительностью сварки. Современные регистраторы могут использовать

ся для непрерывного длительного наблюдения — мониторинга — процесса сварки длительностью до нескольких минут и десятков минут.

Двухканальный запоминающий осциллограф GDS-840C приведен в качестве примера на рис. 11.4. С его помощью покажем порядок и особенности регистрации параметров сварочного процесса:



а



б

Рис. 11.4. Цифровой осциллограф GDS-840C: а — передняя панель, б — пример записи

— экранированными проводами от первичных преобразователей (делителей и шунтов) сигналы напряжения и тока подаются на выходы каналов *Кан1* и *Кан2*;

— в режиме настройки после нажатия кнопки *Авт.Уст.* с помощью виртуальных кнопок меню *F1–F5* выбираются параметры запуска (в примере на рис. 11.4, б — автоматический сигнал канала *Кан1* по переднему фронту, т.е. при резком нарастании сварочного напряжения);

— настраиваются масштабы горизонтальной развертки (в примере — 2,5 мс/дел) и вертикальной развертки по обоим каналам (соответственно 5 В/дел и 200 мВ/дел), при необходимости устанавливаются программные фильтры по обоим каналам;

— запустить и остановить запись можно при помощи кнопки *Пуск.Стоп*, но удобней автоматический запуск с помощью исследуемого сигнала (сварочного напряжения или тока), возможен и внешний запуск, например, по сигналу от сварочного источника или подающего механизма;

— при запуске по переднему или заднему фронту импульсного сигнала фиксируется также небольшой интервал, предшествовавший этому моменту (такая функция *PRETRIGGER* облегчает выяснение причин появления импульсного сигнала, вызвавшего запуск — короткое замыкание электродом, обрыв дуги, капельный перенос);

— после прекращения процесса регистрации регуляторами вертикальной *Вольт/дел* и горизонтальной *Время/дел* развертки можно сжимать или растягивать запись для уточнения подробностей зарегистрированного процесса;

— при необходимости сохранение записи на бумаге осуществляется кнопкой *Печать*.

Специализированный регистратор технологических процессов MPC-02 представлен на рис. 11.5 синхронными осциллограммами тока и напряжения сварочного процесса. С их помощью возможны:

— визуальное представление зависимостей $I_{св}(t)$ и $U_{св}(t)$;

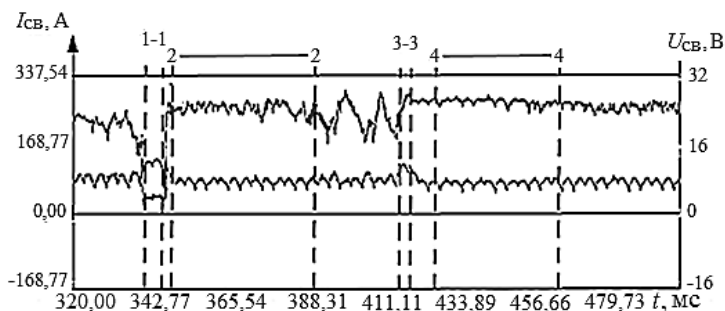
— быстрый просмотр результатов мониторинга сварочного процесса, в том числе за пределами приведенного на экране фрагмента;

— в момент, отмечаемый на графике маркером, указание параметра режима в числовой десятичной форме с высокой точностью (здесь до пятого знака);

— в порядке предварительного анализа сигналов для выделенного на этом графике интервала — обнаружение и вычисление максимального, минимального, среднеарифметического, средневыпрямленного, среднеквадратического значений, а также среднеквадратического отклонения и коэффициента вариации параметра;

— изменение масштабов по обеим осям для повышения выразительности графика;

— сглаживание полученных графиков для устранения случайных ошибок и шумов.



Ка- нал	№ ин- терва- ла	Вре- мя, мс	Мини- ни- маль- ное значе- ние	Макси- си- маль- ное значе- ние	Сред- нее значе- ние	Среднее выпрям- ленное	Среднее квадра- тическое	Средне- квадра- тическое откло- нение	Кoeffи- циент вариации
Chan- nel	No of inter- val	Time, ms	MIN	MAX	Aver- age	Average straight- ened	Mean square	Standard deviation	KVAR
1	1-1	5,20	116,03	142,39	131,25	131,25	131,36	5,44	0,04
	2-2	43,60	63,29	105,48	83,50	83,50	83,81	7,15	0,09
	3-3	2,60	105,48	126,53	120,13	120,13	120,29	6,43	0,05
	4-4	37,20	58,01	89,66	80,92	80,92	80,20	6,76	0,08
2	1-1	5,20	3,33	4,28	4,00	4,00	4,01	0,25	0,06
	2-2	43,60	20,47	26,18	24,12	24,12	24,14	1,12	0,05
	3-3	2,60	3,81	4,28	4,12	4,12	4,131	0,23	0,06
	4-4	37,20	23,32	26,65	25,55	25,55	25,55	0,65	0,03

Рис. 11.5. Регистрограмма процесса ручной сварки (регистратор MPC-02)

11.4. Автоматизированная обработка массивов экспериментальных данных

11.4.1 Формы представления результатов автоматизированной регистрации

Массивы данных, полученных при автоматизированной регистрации электрических параметров режима, для большей наглядности могут быть представлены во временной, частотной и амплитудной формах.

Во временной форме цифровой анализатор или компьютер со специализированной программой (*Matlab*, *Labview*) представляет результаты регистрации в виде осциллограмм $I_{св}(t)$ или $U_{св}(t)$, подобных показанным на рис. 11.4 и 11.5. Это основная форма, с помощью которой получена большая часть иллюстраций данной работы.

В частотной форме анализ выполняется после прямого преобразования Фурье массива данных в спектральную зависимость амплитуд от частоты типа $A_{\text{св}}(f)$. Для увеличения скорости такого преобразования дискретных значений результатов измерений обычно используется процедура быстрого преобразования Фурье, итогом которого является спектральная зависимость (рис. 11.6, а). Частотную форму удобно использовать в следующих случаях.

1) При гармоническом анализе напряжения и тока сварочных источников переменного тока [194]. Например, в спектре частот сварочного трансформатора на рис. 11.6, а кроме основной частоты 50 Гц обнаружены еще и сигналы нечетных гармоник 150 и 250 Гц значительной амплитуды [195].

2) При анализе регулярности капельного переноса электродного металла [196]. А в работе [197] предложен метод определения вида переноса по спектрограмме частоты пиков сварочного тока. При сварке проволокой ER100S-1 в смеси $\text{Ar} + 2\% \text{O}_2$ характер переноса при изменении напряжения холостого хода меняется следующим образом. При $U_x = 6-12$ В, т.е. при сварке короткой дугой, в спектре присутствует максимум, соответствующий коротким замыканиям каплями с частотой 80–100 Гц. При $U_x = 13-24$ В, т.е. при сварке дугой средней длины, в спектре имеется максимум при частоте 70–90 Гц, соответствующий невысоким пикам тока без коротких замыканий, что характерно для мелкокапельного переноса. Наконец, при $U_x = 25-32$ В, т.е. при сварке длинной дугой, в спектре не фиксируется пиков тока, что соответствует струйному переносу.

3) Для выявления источника периодических возмущений, не обнаруженных визуально на осциллограммах.

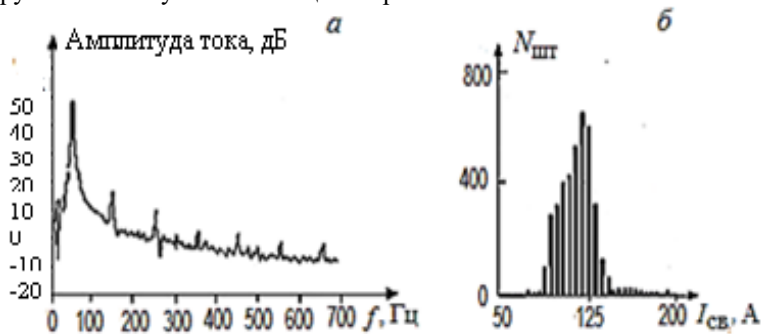


Рис. 11.6. Частотная и амплитудная формы анализа записей сварочного тока: а — спектрограмма частоты пульсаций переменного тока (трансформатор STB 250, электрод ES 18-8-2); б — гистограмма распределения плотности вероятности для тока (выпрямитель ВДУ-506, электрод УОНИ 13/55 Ø4 мм, 120 А)

В амплитудной форме можно определить вероятность наблюдения заданного значения параметра $P(I_{\text{св}})$. В сварочном процессе, где большинство параметров режима являются случайными величинами, результаты измерений принято изображать в наглядном виде гистограммы (столбчатой диаграммы) распределения плотности вероятности для этих параметров [194].

Например, экспресс-система для оценки качества сварочных электродов [198, 199], построенная на основе компьютера *IBM PC/AT* с аналого-цифровым преобразователем поразрядного уравнивания, может использоваться и для оценки стабильности параметров источников для ручной сварки. На рис. 11.6, б приведена гистограмма, полученная с использованием интегрированной системы *MathCAD 5+*. Этот график позволяет сделать вывод об удовлетворительной, хотя и не высокой стабильности сварочного тока. Измеренные характеристики распределения:

- среднеарифметическое значение $I_{\text{св.ср}} = 119$ А при среднеквадратическом отклонении $\sigma_{I_{\text{св}}} = 16$ А;

- модальное (соответствующее максимальной плотности вероятности) значение $I_{\text{Мо}} = 122$ А;

- медианное (соответствующее половинной интегральной вероятности) значение $I_{\text{Ме}} = 114$ А.

Поскольку эти характеристики тока в данном эксперименте не совпадают друг с другом, такое распределение нельзя считать нормальным (гауссовским). Кроме того, необходимо учитывать его двухмодальный характер, поэтому при анализе следует по отдельности оценивать стабильность тока дуги $I_{\text{д}}$ (первая мода 122 А) и тока короткого замыкания каплями $I_{\text{кк}}$ (вторая мода 160 А).

11.4.2. Операции, выполняемые при обработке результатов автоматизированной регистрации

Из всего многообразия вычислительных и логических операций, совершаемых с массивами данных, приведем только те, которые широко используются при анализе сварочных процессов:

- фильтрация сигнала во временной форме для устранения выпадов и шумов;

- изменение масштабов по времени и амплитуде для лучшего выявления подробностей;

- оценка фундаментальных статистических характеристик — стационарности и эргодичности — сварочного процесса с целью уточнения программы автоматической регистрации в последующих экспериментах;

— автоматическое измерение значений (амплитуд и длительностей) изучаемой величины в интересующих точках и характерных интервалах;

— определение и вычисление стандартных значений (максимум, минимум, среднее значение и т.д.), а также статистических характеристик (дисперсия, коэффициент вариации);

— аппроксимация экспериментальных данных гладкой кривой вместо ломаной линии;

— вывод эмпирического уравнения, точнее, расчет коэффициентов принятой функциональной зависимости.

Фильтрация сигнала может выполняться аппаратными или программными приемами. Фильтр нижних частот устраняет высокочастотные шумы и пропускает на дальнейшую обработку низкочастотный полезный сигнал. В сварочном цехе источниками высокочастотных электромагнитных полей являются многочисленные сварочные установки, транспортные устройства с тиристорными и транзисторными приводами, импульсные электротехнологические устройства, в том числе осцилляторы и возбудители. В измерительных проводах автоматических регистраторов зафиксированы сигналы помех с амплитудой до 1,2 В, тогда как полезный сигнал от первичного преобразователя — измерительного шунта — не превышает 75 мВ. Выбор и настройка фильтров, как правило, выполняются до начала автоматической регистрации, но могут и уточняться после предварительного эксперимента. Частота помех имеет широкий диапазон, перекрывающий диапазон полезных импульсных сигналов испытываемого сварочного оборудования. Это особенно усложняет выбор фильтра из-за опасения потери полезного сигнала. Наиболее высока амплитуда помех частотой 50 Гц [200].

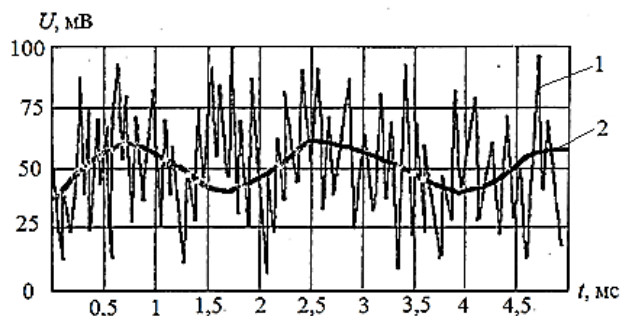


Рис. 11.7. Сигнал сварочного тока на входе (1) и выходе (2) фильтра

На рис. 11.7 показаны осциллограммы сварочного тока до и после фильтрации. Видно, что сигнал после фильтра существенно сглажен. В

работе [200] исследованы амплитудно-частотные и другие характеристики этого аппаратного фильтра, имеющего в своем составе последовательно соединенные полосовой режекторный фильтр и фильтр нижних частот. При его использовании наиболее информативные составляющие сигнала тока оказываются в полосе пропускания фильтра и могут быть качественно и количественно исследованы, например, для анализа капельного переноса электродного металла.

Изменение масштаба изображения на экране по амплитуде и времени — важное достоинство цифровых приборов в сравнении с электроннолучевыми осциллографами. Растянув изображение по вертикали и горизонтали, можно визуально выявить мелкие подробности зарегистрированных процессов (капельный перенос, стабилизирующие импульсы). Однако следует иметь в виду, что импульсы, срезанные при регистрации аппаратным фильтром, при изменении масштаба не восстанавливаются. Сжав изображение по горизонтали, можно уместить на экране больший интервал регистрации. А прокруткой изображения по временной шкале можно выполнить мониторинг всего процесса сварки от зажигания дуги до заварки кратера.

Оценка стационарности, эргодичности и достаточного количества измерений сварочного процесса выполняется по результатам предварительного эксперимента для корректировки программы и методики основной серии экспериментов.

1) Стационарным считается случайный сварочный процесс, у которого статистические характеристики $I_{св.ср}$, $\sigma_{I_{св}}$, $k_{vI_{св}}$, $U_{св.ср}$ и др. мало изменяются от начала к концу сварки. Таковы, например, процессы механизированной и автоматической сварки, выполняемые с постоянной скоростью подачи сварочной проволоки, если не считать начального интервала установления процесса и конечного интервала заварки кратера и растяжки дуги. Интервалы регистрации при этом назначаются произвольно, но для унификации измерительного процесса могут начинаться так же, как в работе [200] — на 5, 25, 45 с от начала сварки и т.д. Наоборот, при ручной сварке по мере расплавления и укорочения электрода скорость его плавления непрерывно возрастает, а частота капельного переноса увеличивается, иногда на 25 %. Такой процесс нельзя назвать стационарным. Поэтому в каждой реализации ручной сварки (при расплавлении каждого электрода) рекомендуется регистрацию параметров выполнять по крайней мере в трех вариантах: через 5 с после зажигания дуги, после расплавления половины электрода и за 10 с до окончания сварки.

2) Эргодическим стационарным процессом считается такой, у которого статистические характеристики, полученные на ансамбле реализаций, т.е. на нескольких образцах при одинаковых условиях, близки к

характеристикам, полученным на одной единственной реализации при таких же условиях. Применительно к сварочному процессу обнаружение свойства эргодичности убеждает в воспроизводимости параметров режима.

Если для конкретного сварочного процесса подтверждены гипотезы стационарности и эргодичности, то этот процесс может анализироваться с помощью аппарата теории случайных функций по уравнениям, приведенным в работе [200]. При этом, несмотря на ограниченное, а не бесконечное количество измерений, при испытании сварочного оборудования корректно характеризовать его статистическими оценками, имеющими в этом случае статус детерминированных функций.

3) Достаточным считается количество измерений $N_{\text{изм}}$, обеспечивающее заданную точность Δ_I оценки сварочного свойства или параметра, в соответствии с уравнением

$$N_{\text{изм}} = K_{\text{кв}}^2 k_{vI}^2 / \Delta_I^2,$$

где $K_{\text{кв}}$ — квантиль, т.е. интервал разброса параметра с заданной доверительной вероятностью, выраженный в количестве «сигм» (например, $\sigma_{\text{Iсв}}$).

Для примера при ручной сварке примем $K_{\text{кв}} = 1,96$, т.е. для нормального распределения в интервале разброса значений тока $\pm 1,96 \sigma_{\text{Iсв}}$, при котором доверительная вероятность $P = 0,95$. Также примем коэффициент вариации тока $k_{vI} = 0,67$, а необходимую точность измерения $\Delta_I = 0,015$ (1,5 %). Тогда достаточное количество измерений $N_{\text{изм}} = 7660$. В случае автоматической регистрации с частотой 1000 Гц на это потребуется около 8 с [200]. В другом примере, при механизированной сварке, для устойчивого режима из табл. 8.9 примем $k_{vI} = 0,12$ и $\Delta_I = 0,01$. Тогда достаточное количество измерений тока $N_{\text{изм}} = 550$.

Трудней обеспечить достаточное количество измерений частоты переноса каплей $f_{\text{кк}}$. При ручной сварке короткие замыкания каплями имеют небольшую частоту 1–10 Гц. Для этого случая приходится удовлетвориться точностью не более 0,1 (10 %) и вести регистрацию в течение полного времени расплавления электрода.

Автоматическое измерение тока и напряжения в интересующей точке на экранном изображении осциллограммы легко выполняется указанием этой точки с помощью маркера, поскольку готовые результаты просто выбираются из соответствующей ячейки в массиве зарегистрированных данных. При этом точность измерений не зависит от оператора, а определяется только точностью первичного измерителя и точностью аналого-цифрового преобразователя, и поэтому довольно высока (порядка 0,1–1 %). Автоматически измеряются:

— мгновенные значения тока, напряжения и других параметров;

— продолжительность этапа или длительность импульса как временная разность между двумя вертикальными линиями, указываемыми на экране (см. рис.11.5);

— приращения тока или напряжения как разность между двумя горизонтальными линиями, указываемыми на экране.

11.5. Комплексная оценка сварочных свойств

Итоговой характеристикой сварочных свойств источника, полуавтомата, автомата или установки является комплексная оценка. Она обобщает результаты разнородных испытаний и гарантирует полную пригодность названного оборудования для качественного выполнения конкретной сварочной технологии. Но она имеет смысл только при положительной оценке всех и каждого из учитываемых сварочных свойств.

11.5.1. Вычисление обобщенного показателя по объективным критериям оценки

Стандартная комплексная, хотя и субъективная, оценка сварочных свойств источников для ручной сварки, предусмотренная в ГОСТ 25616-83 в дополнение к дифференциальным оценкам, выполняется простым суммированием баллов за каждое из пяти свойств. Поэтому максимальная комплексная оценка такого источника не может превышать 25 баллов (при сварке вертикального шва за три свойства — 15 баллов). А допустимое значение этой оценки не может быть ниже 15 или 9 баллов соответственно. Но этот подход не учитывает того факта, что в конкретных условиях сварки значимость того или иного сварочного свойства оказывается различной. Например, при монтаже металлоконструкции здания большое значение имеют надежное зажигание и эластичность дуги, тогда как на повышенное разбрызгивание почти не обращают внимания. А при сварке высокопрочных сталей повышенные требования предъявляют к качеству и форме шва.

Обобщенный показатель $Q_{об}$ — критерий комплексной оценки сварочных свойств — имеет вид суммы или произведения частных показателей Q_i отдельных свойств с учетом значимости g_i каждого.

$$Q_{об} = \sum_{i=1}^n Q_i g_i \quad (11.1) \quad \text{или} \quad Q_{об} = \prod_{i=1}^n Q_i^{g_i} \quad (11.2)$$

Уравнение (11.1), основанное на среднеарифметическом подходе к комплексной оценке, рекомендовано стандартом ОСТ 16.0.800.669-79 «Оборудование электросварочное. Оценка уровня качества». Стандарт применялся для сертификации оборудования при его запуске в производство. Кроме сварочных свойств в этом документе к критериям каче-

ства также отнесены характеристики технического совершенства, надежности, экономичности, патентной защищенности и т.д. Поэтому для непосредственной оценки сварочных свойств стандарт не годится, хотя и дает опыт комплексного подхода к оценке качества.

Уравнение (11.2), отражающее среднегеометрический подход, чаще используется для оценки сварочных свойств [51]. Другие математические формы, предназначенные для оценки технического уровня промышленной продукции (сложная среднегеометрическая, среднегармоническая), описаны в работе [201], но примеры их использования в сварочной технике неизвестны.

Частный показатель Q_i каждого сварочного свойства представляет собой отношение величины M_i критерия данного свойства к его максимальному (идеальному) значению M_{\max} :

$$Q_i = M_i/M_{\max} \quad \text{или} \quad Q_i = M_{\max}/M_i \quad (11.3)$$

Первое уравнение выбирают, если при увеличении M_i сварочное свойство улучшается, второе уравнение — если при уменьшении M_i свойство улучшается. При объективном методе экспериментального определения критерия M_i объективен и характер частного показателя Q_i . В случае же субъективной оценки, например, в баллах по табл. В.2 для источников ручной сварки, делят фактический балл B_i на идеальный. Тогда $Q_i = B_i/5$. Уровень объективности показателя Q_i , например, при оценке качества формирования шва, можно повысить, если все компоненты качества M_i выразить в числовой форме (см. разд.10.3.3).

Весовой фактор (значимость) g_i каждого свойства назначается экспертами для конкретного способа сварки и в соответствии с требованиями ГОСТ 23554.2-81 «Экспертные методы оценки качества промышленной продукции». Работа экспертов по ранжированию сварочных свойств методом Делфи выполняется по следующим правилам:

- каждый эксперт ранжирует каждое сварочное свойство в количественной форме, аргументируя ответ ссылками на нормативные документы, литературные данные и результаты собственных испытаний;

- полный комплект ответов подвергается статистической обработке и передается экспертам перед началом следующего цикла работы (количество циклов тем больше, чем сильнее различаются мнения экспертов);

- прямая дискуссия между экспертами исключена, но каждый из них может проверить истинность своих суждений с учетом мнений и аргументов других экспертов;

- современная форма организации экспертного опроса — Интернет-конференция.

Например, при ручной сварке в цеховых условиях листовых конструкций покрытыми электродами по рекомендации экспертов [51] можно принять значимости g_i : надежности зажигания — 0,3; устойчивости процесса — 0,1; эластичности дуги — 0,05; характера переноса — 0,3 и формирования шва — 0,25.

Пример комплексной оценки источников для ручной сварки приведен в работе [51]. Набор сварочных свойств, учитываемых при оценке, а также значимость g_i каждого критерия приведены в табл. 11.1.

Таблица 11.1.

Определение частных показателей для комплексной оценки сварочных свойств (источники для ручной сварки покрытым электродом)

Сварочное свойство	Частный показатель	Весовой фактор g_i	Непосредственный критерий	Значение частного показателя Q_i			
				1,0	0,8	0,6	0,4
Начальное зажигание	Q_1	0,25	Экспертная оценка Б, балл	5	4	3	1
Стабильность процесса	Q_2	0,10		5	4	3	1
Формирование шва	Q_3	0,20		5	4	3	1
Разбрызгивание металла	Q_4	0,25	$k_p, \%$	1	5	9	13
Эластичность дуги	Q_5	0,05	$l_{др}/d$	2,5–3	2 4	1,5 5	1 6
Минимально возможный ток	Q_6	0,10	$I_{свmin}, A$ Ø2 Ø3 Ø4 Ø5	40 70 120 150	+10	+20	+3 0
Коэффициент наплавки	Q_7	0,05	$\alpha_n, \text{г/А ч}$	$\alpha_n / \alpha_{n,идеал}$			

Подробнее поясним методику определения частных показателей сварочных свойств Q_i . Для нахождения показателей начального зажигания Q_1 , стабильности процесса Q_2 и формирования шва Q_3 сначала выполняется субъективная оценка в баллах по рекомендациям ГОСТ 25616-83 (см. табл. В.2). Затем вычисляются значения каждого показателя по формуле $Q_i = Б_i/5$. Исключением является только низший балл 1 (неудовлетворительно), которому предписано соот-

ветствующим значение $Q_i = 0,4$. Высшее значение $Q_i = 1,0$ (отлично по ГОСТ 25616-83). Показатель потерь на угар и разбрызгивание вычисляется по формуле

$$Q_4 = 1 - 0,05(k_p - 1),$$

наилучшая оценка при $k_p = 1$ %. Показатель эластичности Q_5 принимают по рис. 4.13, высшее значение 1,0 соответствует отношению $l_{др}/d_э = 2,5-3$. Показатель Q_6 минимально возможного тока $I_{св.мин}$ зависит от диаметра электрода. Например, для электрода диаметром 2 мм высшее значение $Q_6 = 1,0$ соответствует току $I_{св.мин} = 40$ А. Показатель снижается на 0,2 при увеличении тока на 10 А. Показатель Q_7 коэффициента наплавки определяется по формуле $Q_7 = \alpha_{н}/9$, где 9 г/А ч — идеальное значение коэффициента наплавки для стальных электродов.

Сравнивались два гипотетических источника: № 1 с пологопадающей ВАХ и № 2 с крутопадающей ВАХ (у последнего $I_{кп}/I_{сву} = 1,15-1,2$). Задавались также видом переноса электродного металла: мелкокапельным при сварке электродами А и крупнокапельным — электродами В. Результаты гипотетических испытаний, а также комплексной оценки источников приведены в табл. 11.2. Обобщенный показатель в соответствии с (11.2) вычислялся по формуле

$$Q_{об} = Q_1^{0,25} \cdot Q_2^{0,10} \cdot Q_3^{0,20} \cdot Q_4^{0,25} \cdot Q_5^{0,05} \cdot Q_6^{0,10} \cdot Q_7^{0,05}.$$

Таблица 11.2.

Комплексная оценка сварочных свойств источников для ручной сварки [51]

Сварочное свойство	Частный показатель (критерий)	Источник № 1		Источник № 2	
		Электрод А Ø 4 мм	Электрод В Ø 5 мм	Электрод А Ø 4 мм	Электрод В Ø 5 мм
Начальное зажигание	Q_1	0,8	1,0	0,7	0,7
Стабильность процесса	Q_2	0,8	1,0	0,9	0,9
Формирование шва	Q_3	0,7	0,8	0,8	0,8
Разбрызгивание металла	Q_4 (k_p , %)	0,92 (2,7)	0,99 (1,2)	1,0 (1,1)	0,99 (1,2)
Эластичность дуги	Q_5 ($l_{др}$, мм)	1,0 (11)	1,0 (13)	0,85 (15)	0,97 (16)
Минимально возможный ток	Q_6 ($I_{св.мин}$, А)	1,3 (90)	1,2 (130)	1,4 (80)	0,2 (190)
Коэффициент наплавки	Q_7 ($\alpha_{н}$, г/А ч)	1,03 (9,3)	1,11 (10,0)	1,14 (10,3)	1,12 (10,1)
Обобщенный показатель	$Q_{об}$	0,87	0,98	0,90	—

Формулой можно пользоваться, если среди частных показателей нет неудовлетворительных оценок (при которых $Q_i \leq 0,4$). Как видно, источник № 2 не пригоден для сварки электродами с крупнокапельным переносом типа В, поскольку один из частных показателей $Q_6 = 0,2 < 0,4$ (минимально возможный ток $I_{\text{свmin}} = 190$ А недопустимо велик). Поэтому и вычисление обобщенного показателя для этого случая бессмысленно. Для остальных режимов значения $Q_{\text{об}} = 0,87\text{--}0,98$ достаточно высоки, если учесть, что приемлемым значением является $Q_{\text{об}} > 0,4$.

11.5.2. Математический и программный аппарат автоматизированной статистической обработки результатов

Обычно ограничиваются расчетом по уравнениям (6.1) и (6.2) средних значений и среднеквадратических отклонений для названных в разд. 11.1 критериев, поскольку массивы зарегистрированных значений тока и напряжения для одного эксперимента могут иметь объем в несколько тысяч отсчетов. Но для обработки таких массивов вполне достаточно вычислительных возможностей и стандартных программ в составе пакетов *MatLab*, *LabView* и им подобных. Поэтому отметим только несколько более сложных случаев обработки результатов измерений, в том числе используемых для комплексной оценки сварочных свойств оборудования.

Система автоматизированной оценки сварочных свойств источников алгоритмами нечеткой логики (fuzzy logic) описана в работе [202]. Обобщенный показатель $Q_{\text{об}}$ вычисляется по тому же соотношению (11.2), но вместо взвешенных отношений Q_i частных показателей здесь для каждого сварочного свойства подставляют числовое значение функции принадлежности μA_i –

$$Q_{\text{об}} = \prod \mu A_i^{g_i} \quad (11.4)$$

Оценка каждого показателя μA_i заключается в отнесении результата испытания к одному из двух множеств: «отвечает требованиям» ($\mu A = 1$) или «не отвечает требованиям» ($\mu A = 0$). Но математический аппарат нечеткой логики позволяет также определить *степень принадлежности* данного значения критерия M_i к первому множеству, т.е. вычислить соответствующие значения μA от 0 до 1. На рис. 11.8 представлены принятые в работе [202] соотношения между абсолютными значениями критериев сварочных свойств M_i и степенью их принадлежности μA_i . Например, для оценки надежности зажигания зависимость степени принадлежности от количества касаний $\mu A_1 = f(N_{\text{кас}})$ принята обратной линейной (рис. 11.8, а). Подобная зависимость от частоты обрывов $\mu A = f(n_{\text{обр}})$ характеризует устойчивость. Для оценки стабильности напряжения принят закон нормального распределения $\mu A_2 = f(k_{vU_{\text{св}}})$ в зависимости от коэффициента вариации (рис. 11.8, б) (хотя по нашему мнению, при ручной сварке важнее оценка стабильности сварочного тока, поскольку именно она зависит от характеристик источника).

Разбрызгивание электродного металла характеризуется сигмообразной зависимостью $\mu A_3 = f(k_p)$ (рис. 11.8, в). Формирование сварного шва оценивается пропорциональной зависимостью $\mu A_4 = f(B)$ от баллов за качество, выставля-

емых сварщиком-испытателем (рис.11.8, з). Это единственный субъективный критерий в описанной методике. Наконец, эластичность дуги характеризуется трапециoidalной зависимостью $\mu A_5 = f(l_{др}/d_3)$ от разрывной длины дуги (рис. 11.8, д).

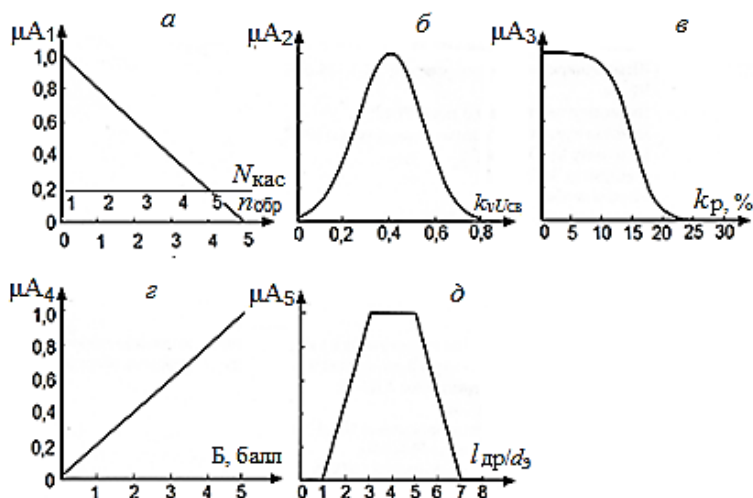


Рис. 11.8. Функции принадлежности: а — надежности зажигания и устойчивости процесса, б — стабильности напряжения, в — разбрызгивания, з — формирования шва, д — эластичности дуги

В табл. 11.3 приведен пример пользования описанной методикой с помощью рис. 11.8. Как видно, у инверторного источника TPS 5000 значения степени принадлежности по каждому из 5 сварочных свойств довольно высоки. Поэтому и обобщенный показатель, вычисленный по формуле (11.4) относительно велик — $Q_{об} = 0,62$. При этом учтем, что при типичных значениях весового фактора g_i традиционной оценке по ГОСТ 25616-83 «отлично» соответствует значение $Q_{об} = 0,51-1$, оценке «хорошо» — $0,27-0,5$, «удовлетворительно» — $0,17-0,26$, «неудовлетворительно» — $0-0,16$.

Методика комплексной оценки сварочных свойств алгоритмами нечеткой логики сложнее приведенной ранее (см. разд. 11.5.1). Здесь степень принадлежности для каждого свойства приходится вычислять по собственной, иногда довольно сложной зависимости из приведенных на рис.11.8. Но в этом же заключается и достоинство вышеописанной методики — регламентированные значения степени принадлежности μA лучше дифференцированы по их влиянию на технологический результат. Это хорошо видно на примере с оценкой эластичности. Действительно, традиционная методика одобряет беспредельное увеличение непосредственного критерия — отношения $l_{др}/d_3$. А вышеизложенная методика нечеткой логики дает высшую оценку $\mu A_5 = 1$ только при $l_{др}/d_3 = 3-5$, что лучше отвечает современным технологическим представлениям о необходимом ограничении разрывной длины дуги.

Таблица 11.3.

Комплексная оценка сварочных свойств алгоритмами нечеткой логики (инверторный источник Trans Puls Synergic 5000, ручная сварка покрытыми электродами)

Сварочное свойство	Непосредственный критерий	Значение критерия	Степень принадлежности μ_A
Надежность начального зажигания	Количество касаний $N_{\text{кас}}$, раз/эл	1,44	0,912
Стабильность сварочного напряжения	Коэффициент вариации напряжения $k_{vU_{\text{св}}}$	0,43	0,977
Разбрызгивание электродного металла	Коэффициент потерь на угар и разбрызгивание k_p , %	11,5	0,852
Качество формирования шва	Экспертная оценка Б, балл	4,33	0,866
Эластичность дуги	Отношение разрывной длины к диаметру электрода $l_{\text{др}}/d_s$	2,90	0,950
Обобщенный показатель		Отлично	0,62

Информационно-измерительная система комплексной оценки сварочных свойств источников методами теории вероятности описана в работе [203]. В ней экспериментально обнаружен трехмодальный характер взаимного распределения тока и напряжения (рис. 11.9). Это соответствует трем стадиям электрического сварочного процесса: короткого замыкания каплями, устойчивого горения дуги и холостого хода, точнее провалов тока. Поэтому математическая обработка электрических сигналов потребовала кластеризации, т.е. разбиения массива измеренных значений на три непересекающихся подмножества. При этом получен закон распределения плотности вероятности $P(x)$ как сумма трех нормальных (гауссовских) распределений:

$$P(x) = \sum_{k=1}^3 P_k \frac{1}{\sigma_k \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-M_k)^2}{2\sigma_k^2}}$$

где $M_k = M_1, M_2$ или M_3 — средние значения тока или напряжения при коротком замыкании, горении дуги и холостом ходе соответственно; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ — их среднеквадратические отклонения; P_1, P_2, P_3 — вероятности соответствующих стадий процесса.

С использованием функции наибольшего правдоподобия вычисляются идентификационные характеристики конкретного сварочного процесса, т.е. значения названных параметров распределения для напряжения и тока. Например, для ручной сварки такие значения приведены в табл. 11.4. Графическое

представление совместного распределения тока и напряжения для этого случая показано на рис. 11.9.

Таблица 11.4

Идентификационные характеристики распределения плотности вероятности по отдельным стадиям сварочного процесса (выпрямитель ВДУ-1201, 140 А, 22 В)

Стадия процесса	Короткое замыкание			Горение дуги			Холостой ход		
Коэффициент уравнения $P(x)$	P_1	σ_1	M_1	P_2	σ_2	M_2	P_3	σ_3	M_3
Сварочное напряжение $U_{св}$	0,12	1,58	4,23	0,81	2,36	22,4	0,07	1,30	84,6
Сварочный ток $I_{св}$	0,12	4,77	172,5	0,78	9,73	135,9	0,10	0,14	22,3

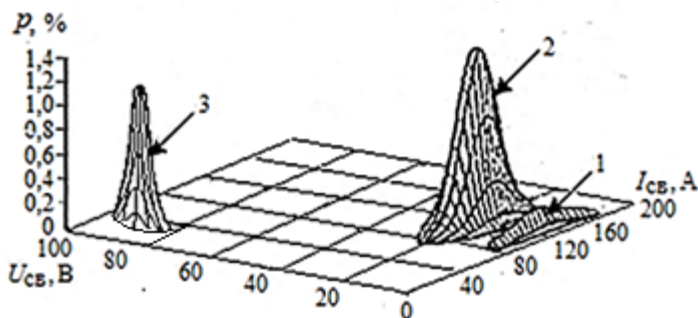


Рис. 11.9. Распределение плотности вероятности тока и напряжения при ручной сварке: 1 — короткое замыкание, 2 — горение дуги, 3 — холостой ход

В этой работе характеристики распределения соотносены с показателями сварочных свойств источников, предписанными в ГОСТ 25616-83. С этой целью разработан классификатор, объединяющий две различные нейронные сети (рис. 11.10). Первая сеть состоит из слоя Кохонена с конкурентным обучением и предназначена для кластеризации входного массива измеренных токов и напряжений. Вторая сеть — слой персептронов (компьютерных моделей восприятия образов) — хранит образы, принадлежащие соответствующим балльным значениям показателей сварочных свойств.

Алгоритм функционирования классификатора состоит из таких шагов:

— на вход подается массив идентификационных характеристик контролируемого сварочного процесса;

— для каждого столбца матрицы определяется нейрон-победитель в карте Кохонена (номер кластера) и заносится в вектор выхода;

— в соответствии с решаемой задачей возбуждается один из персептронов, на который и подается результат кластеризации;

— производится процедура распознавания образов и на выходе одного из нейронных элементов персептрона появляется единица, а на остальных нули;

— считывается номер элемента персептрона с единицей, поскольку каждый из них имеет единственную цену от 1 до 5, соответствующую баллу за данное сварочное свойство по ГОСТ 25616-83;

— оценки за каждое свойство передаются в компьютерный протокол и могут формировать отчет об испытании.

Такая система генерирования формализованных оценок сварочных свойств обеспечивает высокую объективность благодаря исключению субъективного мнения сварщика-испытателя, чрезвычайно высокую производительность массовых испытаний (до пяти раз в сравнении с традиционной), а также возможность комплексной оценки суммированием баллов, в том числе с учетом значимости каждого. Однако разработка самой системы чересчур трудоемка, поскольку при обучении нейронной сети распознавания образов потребуется громоздкий экспериментальный материал для установления связи идентификационных характеристик с балльными показателями сварочных свойств.

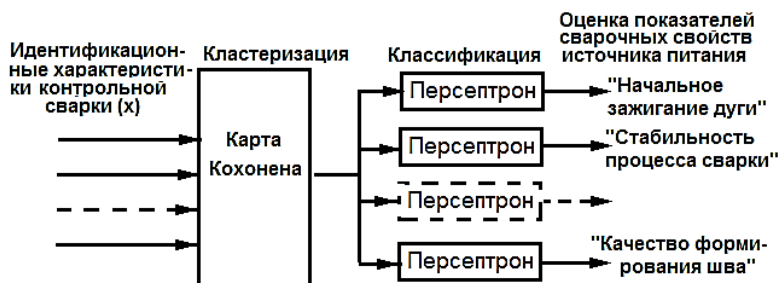


Рис. 11.10. Архитектура иерархического нейронного классификатора

Информационно-измерительная система на основе марковской модели процесса плавления электрода описана в работе [204]. В эксперименте обнаружен вероятностный характер электрических и тепловых явлений при ручной сварке, позволяющий отнести такой процесс к марковским с чередованием трех состояний: короткое замыкание–дуговой разряд–холостой ход. Математический аппарат марковской теории позволяет вычислить интенсивности состояний и вероятности переходов из одного состояния в другое. Устойчивость такого процесса определяется успешностью переходов от коротких замыканий к дуговому разряду, а не к холостому ходу. В одном из примеров устойчивого процесса вероятность $P_{\text{кз-др}} = 0,97$, а $P_{\text{кз-хх}} = 0,03$. Таким образом, вероятности переходов

могут использоваться в качестве критериев устойчивости при испытании источника, а на их основе и для комплексной оценки сварочных свойств источника.

11.5.3. Процедура автоматизированной комплексной оценки

При испытании оборудования для ручной и механизированной сварки предлагается такой порядок:

- выполняется наплавка с автоматизированной регистрацией сварочного тока и напряжения с помощью запоминающего осциллографа или регистратора сварочных процессов по программе и на режимах, указанных в ГОСТ 25616-83 (дополнительно следует выполнить фрагментарные записи для оценки зажигания, эластичности, заварки кратера и растяжки дуги);

- производится автоматизированная обработка записей и вычисление значений электрических критериев сварочных свойств, названных в разд. 11.1 (для ручной сварки — надежности зажигания, устойчивости процесса, стабильности тока, эластичности дуги и характеристик переноса; для механизированной сварки — надежности установления дуги, устойчивости процесса, стабильности тока и напряжения, характеристик переноса);

- вычисляется обобщенный показатель комплексной оценки на всех режимах (при необходимости — с добавлением результатов субъективной оценки в баллах разбрызгивания и формирования шва);

- формируется компьютерный протокол с результатами расчетов критериев сварочных свойств и обобщенного показателя и выводом о функциональной пригодности данного аппарата для выполнения конкретного технологического процесса.

*Пример автоматизированной системы комплексной оценки сварочных свойств полуавтоматов для механизированной сварки приведен в работе [85]. Автоматизированное измерение сварочного тока и напряжения выполнялось с помощью двухканального регистратора сварочных процессов AWR-224 и цифрового запоминающего осциллографа DPO-3014. Анализ массива данных, получающихся из оцифрованных осциллограмм, производился с помощью стандартного пакета прикладных программ типа *MatLab* и *Signal Express*. В результате статистической обработки этих данных получают отдельные критерии сварочных свойств в виде коэффициентов вариации k_{vi} (см. табл. 8.9). Далее вычисляется обобщенный показатель*

$$Q_{об} = \sum k_{vi} g_i.$$

Он представляет собой аддитивную свертку отдельных критериев, состоящих из линейных комбинаций коэффициентов вариации k_{vi} с соответствующими значимостями g_i . Наконец, программой создается текстовый файл, содержащий все рассчитанные параметры, который в дальнейшем может использоваться в качестве протокола аттестационного испытания. В табл. 11.5 приве-

дены сведения по испытанию трех полуавтоматов с управляемым переносом электродного металла. Все аппараты показали высокий уровень отдельных критериев сварочных свойств, кроме стабильности напряжения дуги. Последнее объясняется неоправданно строгой оценкой устойчивости процесса по уровню флуктуаций напряжения дуги в высокочастотном диапазоне 500–5000 Гц. Тем не менее, комплексная оценка всех аппаратов довольно высока — обобщенный показатель $Q_{об}$ не более 0,2 (здесь низкое значение $Q_{об}$ как средневзвешенного коэффициента вариации k_v говорит о высокой стабильности параметров).

При сопоставлении полуавтоматов друг с другом все же обнаруживаются отличия, объясняющиеся разным уровнем технического совершенства и эффективности алгоритма управления переносом. Наилучший результат обеспечивает аппарат системы *CMT* ($Q_{об} = 0,144$), управляющий переносом как с помощью привода подачи, так и с помощью источника. Близкий результат у аппарата системы *STT* ($Q_{об} = 0,150$) с гибкой программой управления переносом только с помощью источника. Заметно хуже результат у аппарата системы *ВКЗ* ($Q_{об} = 0,176$) с жесткой системой управления тиристорного выпрямителя.

Таблица 11.5.

Комплексная оценка сварочных свойств полуавтоматов для механизированной сварки (проволока *Св-08Г2С* Ø1,2 мм, $V_{св} = 0,5$ м/мин, $V_{под} = 3,2–3,3$ м/мин, кроме *CMT*) [205]

(Коэффициент вариации) х (значимость)	Марка		
	ВД-506ДК, ВКЗ	<i>Invertec STT</i>	<i>Trans Puls Synergic 3200 CMT</i>
частоты коротких замыканий $k_{v/кк}$	0,12х0,10	0,09х0,10	0,09х0,10
длительности коротких замыканий $k_{v/кк}$	0,24х0,20	0,21х0,10	–
пикового тока коротких замыканий $k_{v/кп}$	0,08х0,20	0,08х0,10	–
частоты импульсов сброса капель $k_{v/н}$	–	–	0,09х0,20
длительности горения дуги $k_{v/д}$	–	0,12х0,10	0,12х0,10
тока дуги $k_{v/д}$	–	0,11х0,10	0,09х0,10
сварочной мощности $k_{v/Рсв}$	0,16х0,20	0,15х0,20	0,15х0,20
сварочного тока $k_{v/св}$	0,11х0,20	0,12х0,20	0,13х0,20
напряжения дуги $k_{v/Uд}$	0,42х0,10	0,35х0,10	0,40х0,10
Обобщенный показатель $Q_{об}$	0,176	0,150	0,144

В развитие описанной работы создана программа компьютерной комплексной оценки сварочных свойств «СтатСвар 1.0», инвариантная к различным алгоритмам управления процессом сварки с короткими замыканиями [205]. В нее дополнительно введены критерии оценки разбрызгивания электродного металла и формирования шва. Кроме того, отдельные критерии, в том числе приведенные в табл.11.5, системно объединены по принадлежности к одному сварочному свойству, предусмотренному в ГОСТ 25616-83. Это повышает объективность оценки свойств по данному стандарту, совершенствуя их числовую характеристику.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Каждый потребитель оборудования для дуговой сварки, приобретая источник питания, аппарат для механизированной и автоматической сварки или комплектную установку для специального метода сварки, задается вопросом:

- «хороший» или «плохой» данный источник,
- достаточен ли уровень технических характеристик и набор специальных функций для заявленного назначения данного аппарата,
- соответствует ли высокая цена данной установки качеству ее функционирования с точки зрения универсальности по способам сварки и свариваемым материалам, обеспечения высокой производительности и гарантии качества сварных соединений.

Ответ на такой вопрос можно получить на действующем экспонате на выставке или в демонстрационном зале завода, производителя сварочного оборудования. Ответ может быть получен также в цехе завода, пользователя этого оборудования, методом пробной сварки типичного соединения или конструкции. Экспонируемое оборудование следует проверить во всех вариантах назначений, во всем диапазоне заявленных характеристик, с показом всех специальных функций и приемов эксплуатации. Потребитель может оценить все сварочные свойства источников и другого оборудования по непосредственным критериям, описанным в данной работе. Если показ оборудования в действии не предусмотрен, потребитель должен иметь возможность оценки сварочных свойств с помощью технической документации по косвенным критериям, также охарактеризованным в данной работе.

Каждый производитель оборудования, со своей стороны, должен быть готовым к утвердительному ответу на те же вопросы в следующей форме:

- предлагаемый источник разработан с учетом опыта производственной эксплуатации предшествующего поколения оборудования, отвечает мировому уровню технических характеристик и обеспечивает высокие значения критериев сварочных свойств;

— предлагаемый аппарат имеет современную элементную базу, обладает рациональным набором специальных функций и широким диапазоном настройки параметров, способствующими высокой производительности и достаточному качеству сварки;

— предлагаемая установка представляет собой завершённый комплекс энергетических, технологических и механических устройств с МП-контроллером, обеспечивающим необходимую циклограмму, стабилизацию всех параметров режима, а также управление переносом электродного металла и формированием сварного шва.

Производитель обязан подтвердить заявленный уровень технических характеристик и сварочных свойств предлагаемого оборудования по требованиям технологических регламентов. Этой цели отвечают процедуры аттестационных и сертификационных испытаний.

Аттестация сварочного оборудования, применяемого при изготовлении опасных производственных объектов, проводится подразделениями НАКС по нормативной документации Ростехнадзора. Целью аттестационных испытаний является проверка технических характеристик сварочного оборудования, определяющих требуемое качество сварных соединений таких объектов. В данной работе создана методическая основа для таких испытаний, в ней предлагаются меры для повышения объективности оценки сварочных свойств, описано оборудование для комплектования испытательных лабораторий, в том числе для автоматизации испытаний.

Сертификация — это установление соответствия сварочного оборудования требованиям нормативной документации, в частности требованиям ГОСТ. В настоящее время системы одобрения и разрешения выпуска нового сварочного оборудования вышестоящими или авторитетными доверенными организациями в стране не существует. Поэтому соблюдение требований стандартов в части обеспечения сварочных свойств оборудования гарантирует только производитель. Еще хуже положение с регламентацией этих свойств в отношении импортного оборудования. Хотя известно множество примеров превосходства импортных источников и аппаратов, которые к тому же отвечают более высокому уровню их национальных и международных стандартов. Поэтому в данной работе большинство примеров радикального улучшения

сварочных свойств заимствовано из иностранной журнальной, интернетной и эксплуатационной документации.

Проблема со стандартизацией сварочного оборудования в России стоит довольно остро. Некоторые стандарты разработаны более 40 лет назад, и несмотря на более поздние изменения и дополнения не отвечают даже достигнутому уровню развития сварочного оборудования и поэтому сдерживают его. Так, коллекторные генераторы давно не производятся, а попытки распространить требования к ним на более совершенные вентильные генераторы не только бессмысленны, но и вредны. Современная система технологического регламентирования должна содержать требования к инверторным источникам, транзисторным постовым регуляторам, полуавтоматам с транзисторным, вентильным и частотно-регулируемым приводом. Также следует сформулировать правила проектирования и оформления систем управления: параметры МП-контроллеров, циклограммы программного управления, оптимальный набор и характеристики специальных функций, требования к системам стабилизации параметров режимов, а также к системам управления переносом электродного металла и формированием шва.

Особенного внимания заслуживает ГОСТ 25616-83 на методы испытания источников для ручной и механизированной сварки, который в свое время способствовал совершенствованию сварочных свойств, а теперь препятствует ему. В новом технологическом регламенте на испытания сварочных свойств следует:

- систематизировать названия сварочных свойств в согласии с терминологией смежных фундаментальных наук;

- отобрать наиболее информативные непосредственные и косвенные критерии для оценки каждого свойства;

- предписать экспериментальную методику определения критериев и допустимые их значения;

- обеспечить высокий уровень объективности оценки сварочных свойств за счет использования испытательной аппаратуры и автоматических средств регистрации и обработки измеренных параметров.

Автор работы считает ее публикацию своим вкладом в разработку нового технологического регламента на испытания сварочных свойств оборудования для дуговой сварки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Славянов Н.Г. Электрическая отливка металлов. Руководство к установке и практическому применению ее. — репринт. воспроизв. изд. С.Петербург. 1892 / Н.Г. Славянов — М.: Машгиз, 1954.
2. Kaufmann W. Elektrodynamische Eigentümlichkeiten der Gase/ *Annalen der Physik*. 1900. — Т. 307. №. 5. — с. 158–178.
3. Миткевич В.Ф. О вольтовой дуге./дисс. доктора наук // СПб, 1905.
4. Лесков Г.И. Переменному току — дорогу в сварку / Г. И. Лесков, В. П. Лугин. — Тула: Приок. кн. изд-во, 1969. — 61 с
5. Kas J. Appreciation of the quality of welding transformers / J.Kas // *I.I.W. Doc II B*–167–66, II–424–67.
6. Патон Б.Е. Электрооборудование для дуговой и шлаковой сварки / Б.Е. Патон, В.К. Лебедев — М.: Машиностроение, 1966. — 360 с.
7. Лесков Г.И. Электрическая сварочная дуга / Г.И. Лесков. — М.: Машиностроение, 1970. — 335 с.
8. Ленивкин В.А. Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах: 2-е изд. / В.А. Ленивкин, Н.Г. Дюргеров, Х.Н. Сагиров. — М.: Гефест, 2011. — 368 с.
9. Металлургия дуговой сварки. Процессы в дуге и плавление электродов / под ред. И.К. Походни. — Киев: Наукова думка, 1990. — 244 с.
10. Мазель А.Г. Технологические свойства электросварочной дуги / А.Г. Мазель. — М.: Машиностроение, 1969. — 178 с.
11. О разработке критериев и методов оценки сварочных свойств источников питания для дуговой сварки / И.И. Заруба, Ч.А. Казакивичус, А.И. Лаужадис и др.// Разработка, исследование и внедрение новых источников питания сварочной дуги: тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. Вильнюс. 1981. ч. 1. с. 3–7.
12. ГОСТ 25616 -83 (СТ СЭВ 3235-81). Источники питания для дуговой сварки. Методы испытания сварочных свойств. — М.: Изд-во стандартов, 1983. — 18 с.
13. РД 03-614-03. Порядок применения сварочного оборудования при изготовлении, монтаже, ремонте и реконструкции технических устройств для опасных производственных объектов. Утвержден Постановлением Госгортехнадзора России от 19.06.2003 г. № 102.

14. Милютин В.С. Методика объективной оценки сварочных свойств источников питания для ручной дуговой сварки / В.С. Милютин, Р.Ф. Катаев // Подготовка специалистов сварщиков и научные исследования: сб. науч. тр. Екатеринбург: УГТУ, 2006. с. 116–133.

15. Милютин В.С. Отработка конструкции универсального тиристорного выпрямителя с микропроцессорным управлением / В.С. Милютин, А.А. Морозов, А.Г. Сивоплясов // Сварочное производство. — 2006. № 10. с. 16–22.

16. Милютин В.С. Новое поколение сварочных агрегатов с электронным управлением / В.С. Милютин, А.Г. Сивоплясов, М.Ю. Гималдинов // Сварка и диагностика. 2008. № 3. — с. 23–28.

17. Технологические комплекты «источник–полуавтомат» с микропроцессорным управлением для сварки неповоротных стыков трубопроводов / В.С. Милютин, Ю.Б. Ездаков, А.Г. Сивоплясов и др. // Сварочное производство. 2007. № 9. с. 24–29.

18. Милютин В.С. Оценка надежности зажигания при испытании источников для ручной сварки покрытым электродом / В.С. Милютин, А.В. Полухин // Сварка и диагностика. 2012. № 2. с. 22–26.

19. Милютин В.С. Оценка эластичности дуги при испытании источников для ручной сварки покрытым электродом/ В.С. Милютин, А.В. Полухин // Сварка и диагностика. 2012. № 1. с. 46–51.

20. ГОСТ Р МЭК 60974-1-2012. Оборудование для дуговой сварки. Часть 1. Источники сварочного тока/ Введен 22.11.2012. — М.: Стандартинформ, 2013. — 126 с.

21. Патент РФ. RU 2467845 C1, МПК В23К 9/067. Способ зажигания дуги при ручной дуговой сварке с комбинированием этапов мягкого и горячего пуска / А.А. Морозов, В.С. Милютин — Оpubл. 27.11.2012.

22. Сагиров Х.Н. Зажигание сварочной дуги / Х.Н. Сагиров, Н.Г. Дюргеров, И.С. Морозкин. — Ростов-на-Дону: Гефест, 1999. — 200 с.

23. Farson D. Metal Arc Initiation in Gas Metal Arc Welding. / D. Farson, C. Conrardy, J. Talkington // Welding Journal. 1998. № 8. p. 315-s–321-s.

24. Оборудование для дуговой сварки: справочное пособие / под ред. В.В. Смирнова. — Л.: Энергоатомиздат, 1986. — 656 с.

25. Ерохин А.А. Основы сварки плавлением. Физико-химические закономерности / А.А. Ерохин — М.: Машиностроение, 1973. — 448 с.

26. Цыбулькин Г.А. К вопросу об устойчивости процесса дуговой сварки плавящимся электродом / Г.А. Цыбулькин // Автоматическая сварка. 2002. № 5. с. 17–19.

27. Ersoy U. Observation of Arc Start Instability and Spatter Generation in GMAW / U. Ersoy, S.J. Hu, E. Kannatey-Asibu // Welding Journal. 2008. № 2. p. 51-s–56-s.

28. Мик Д.М. Электрический пробой в газах / Д.М. Мик, Д.Д. Крэггс. — М.: Изд-во иностр. лит., 1960. — 605 с.

29. Лугин В.П. Автоматизация процессов первоначального и повторного возбуждения сварочной дуги / В.П. Лугин, А.Г. Светлов, В.В. Коряжкин // Управление сварочными процессами: сб. науч. тр.—Тула. ТПИ. 1977. с. 46–51.

30. Лесков Г.И. Исследование электрического пробоя промежутков между сварочными электродами. / Г.И. Лесков, В.П. Лугин // Сварочное производство. 1974. №2. с. 10–11.

31. Бейер М. Техника высоких напряжений: Теоретические и практические основы применения: Пер. с нем. / М. Бейер, В. Бёк, К. Мёллер, В. Цаенгель/ под ред. В.П. Ларионова — М.: Энергоатомиздат, 1989 — 555 с.

32. Дудко Д.А. Тиристорные генераторы импульсов типа УПД-1 / Д.А. Дудко, В.Г. Федотенков, Н.М. Махлин // Автоматическая сварка. 1980. № 6. с. 61–63.

33. Белинский С.Н. Оборудование для сварки неплавящимся электродом в среде инертных газов / С.Н. Белинский, Б.А. Каганский, Б.Я. Темкин. — Л.: Энергия, 1975. — 118 с.

34. Лугин В.П. Возбуждение, стабилизация и ориентация дуги при сварке / В.П. Лугин. — Тула: Тул. политех. инст., 1980. — 56 с.

35. Махлин Н.М. Анализ и методика расчета электронных устройств последовательного включения для бесконтактного возбуждения дуги / Н.М. Махлин, А.Е. Коротынский // Автоматическая сварка. 2014. № 1. с. 34–44.

36. Светлов А.Т. Разработка аппаратуры для возбуждения дуги при сварке и резке от серийных источников питания: автореф. дис. канд. техн. наук / МВТУ. — М. 1983. — 16 с.

37. Патент РФ. RU 2011493 C1, МПК В23К 9/067. Способ возбуждения сварочной дуги и устройство для его осуществления/ А.П. Буденный — Оpubл. 30.04.1994.

38. Ланкин Ю.Н. Показатели стабильности процесса дуговой сварки плавящимся электродом / Ю.Н. Ланкин // Автоматическая сварка. 2011. № 1. с.7–15.

39. Ворновицкий И.Н. Влияние обрывов дуги на образование пор при сварке электродами с фторисгокальциевым покрытием. / И.Н. Ворновицкий. // Автоматическая сварка. 1971. № 2. с. 41–42

40. Взаимосвязь порообразования и параметров дуги при сварке электродами с основным покрытием / И.К. Походня, В.Н. Горпенюк, В.Е. Пономарев и др. // Автоматическая сварка. 1984. № 12. с. 19–22.

41. Статистическая оценка переноса металла и стабильности горения сварочной дуги / И.К. Походня, В.Н. Горпенюк, В.Е. Пономарев и др. – К.: ИЭС им. Е.О. Патона, 1988. — 31 с.

42. Li P.J. Analysis of an Arc Light Mechanism and Its Application in Sensing of the GTAW Process / P.J. Li, Y.M. Zhang // Welding Journal. 2000. № 9. p. 252-s–260-s.

43. Ланкин Ю.Н. Акустическая эмиссия сварочной дуги (Обзор) / Ю.Н. Ланкин // Автоматическая сварка. 2001. №2. с.25–31.

44. Гарсия-Родригес А. Исследование процесса горения дуги и переноса электродного металла при сварке покрытыми электродами / А. Гарсия-Родригес, К.Р. Гомес Перес, Р. Куинтата Пучол // Автоматическая сварка. 2012. № 6. с. 18–24.

45. Драган С.В. Обеспечение стабильности сварки под флюсом на малых плотностях тока/ С.В. Драган, Ю.А. Ярослав // Автоматическая сварка. 2008. № 1. с. 33–36.

46. Лапин И.Е. Неплавящиеся электроды для дуговой сварки / И.Е. Лапин, В.А. Косович . — ВолгГТУ, Волгоград, 2001. — 190 с.

47. Рабинович И.Я. Оборудование для дуговой электрической сварки. Источники питания дуги / И.Я. Рабинович. — М.: Машгиз, 1958. — 380 с.

48. Сварка в машиностроении: справочник в 4 т., Т.4 / под ред. Ю.Н. Зорина — М.: Машиностроение, 1979. — с. 9–41.

49. Гладков Э.А. Автоматизация сварочных процессов: учебник/ Э.А. Гладков, В.Н. Бродягин, Р.А. Перковский — М.: Изд. МГТУ, 2014. — 421 с.

50. Милютин В.С. Источники питания для сварки: учебник / В.С. Милютин, М.П. Шалимов, С.М. Шанчуров . — М.: Айрис-пресс, 2007. — 384 с. ff

51. Методика комплексной оценки сварочно-технологических свойств источников питания. / И.К. Походня, В.Я. Пономарев, И.И. Заруба и др. // Новые сварочные источники питания: сб. науч. тр. АН Украины, ИЭС им. Е.О. Патона. — Киев, 1993. — с. 94–103.

52. Хренов К.К. Электрическая сварочная дуга / К.К. Хренов. — К.: Машгиз, 1949. — 204 с.

53. Потапьевский А.Г. Сварка в защитных газах плавящимся электродом. Ч.1 / А.Г. Потапьевский. — К.: Экотехнология, 2007. — 192 с.

54. Патон Б.Е. Сварочные источники питания с импульсной стабилизацией горения дуги / Б.Е. Патон, И.И. Заруба, В.В. Дыменко и др. — К.: Экотехнология, 2007. — 248 с.

55. Пентегов И.В. Нормирование напряжения холостого хода на выходных клеммах источников питания для ручной дуговой сварки. / И.В. Пентегов, С.В. Рымар // Сварочное производство. 1998, № 4. с. 22–25.

56. Заруба И.И. Исследование процессов механизированной дуговой сварки плавящимся электродом и разработка источников питания для них: автореф. дисс. докт. техн. наук (03.1976) / И.И. Заруба (ИЭС им. Е.О. Патона). — Киев. 1976. — 46 с.

57. Дюргеров Н.Г. Саморегулирование и управление процессом сварки короткой дугой / Н.Г. Дюргеров, Л.А. Соловьянюк // Сварочное производство. 2014. № 1. с. 3–5.

58. Новый тип сварочного выпрямителя / И.И. Заруба, В.П. Латанский, В.М. Сидоренко и др. // Автоматическая сварка, 1995, № 5. с. 53–57.

59. Сравнительный анализ сварочно-технологических свойств современных выпрямителей для сварки в защитных газах / М.В. Карасев, Д.Н. Работинский, Г.В. Павленко и др. // Сварка в Сибири. 2003. № 2. с. 17–22.

60. Мейстер Р.А. Особенности зажигания и горения дуги на малых токах при сварке в углекислом газе / Р.А. Мейстер, А.Р. Мейстер // Сварочное производство. 2012. № 7. с. 30–32.

61. Источник питания для ручной дуговой сварки / В.А. Ленивкин, П.И. Петров, Г.Г. Кленов и др. // Сварочное производство. 1995. № 8. с. 32–35.

62. Римский С.Т. Руководство по технологии механизированной сварки в защитных газах / С.Т. Римский. — К.: Экотехнология, 2006. — 60 с.

63. Патон Б.Е. Об оценке стабилизирующих свойств флюса при автоматической сварке / Б.Е. Патон // Автоматическая сварка. 1950. № 2. с. 85–89.

64. Лугин В.П. Сравнительные испытания устойчивости горения дуги при сварке штучными электродами переменным током / В.П. Лугин // Сварочное производство. 1975. № 1. с. 39–40.

65. Стародубцев Л.В. Зависимость повторного зажигания дуги переменного тока от физических свойств материала, служащего катодом / Л.В. Стародубцев, И.К. Походня // Автоматическая сварка. 1984. № 6. с. 1–4.

66. Шафранский Л.Г. Оценка устойчивости дуги переменного тока / Л.Г. Шафранский, Л.Н. Орлов, А.В. Абрашин // Автоматическая сварка. 1972. № 4. с. 18–19.

67. Закс М.И. Трансформаторы для электродуговой сварки / М.И. Закс, Б.А. Каганский, А.А. Печенин. — Л.: Энергоатомиздат, 1988. — 136 с.

68. Salagean T. Recherchessur le comportement dynamique des transformateurs de soudage / T. Salagean, C. Boarna // Soudageet techniques connexes. 1971. № 3.

69. Троицкий В.А. Критерий устойчивости горения дуги переменного тока / В.А. Троицкий, Т.Г. Шигаев // Автоматическая сварка. 1982. № 11. с. 21–23.

70. Короткова Г.М. Источники питания переменного тока для сварки неплавящимся электродом алюминиевых сплавов / Г.М. Короткова. — Тольятти: ТГУ, 2009. — 335 с.

71. Печенин А.А. Исследование статических и динамических свойств трансформаторов с подвижной обмоткой / А.А. Печенин, В.А. Жуков // Пути развития источников питания для электродуговой сварки: сб. научн. трудов. — Вильнюс: Респ. инст. науч.-техн. инф, 1968. с. 12–13.

72. Коряжкин В.В. Оценка пригодности источников питания для ручной сварки переменным током / В.В. Коряжкин, В.П. Лугин, В.П. Нестеров // Сварочное производство. 1978. № 3. с. 58–60.

73. Carrer A. Comportamentodinamico di trasformatori per saldatura ad arco / A. Carrer // Rivista italiana delle saldatura. 1963. № 1.

74. Пентегов И.В. Выбор напряжения холостого хода источников питания для ручной дуговой сварки переменным током / И.В. Пентегов, В.В. Дыменко, С.В. Рымар // Автоматическая сварка. 1995. № 5. с. 35–39.

75. Исследование эластичности сварочной дуги, питаемой от источника с индуктивностью и емкостью / В.Ю. Арлаускас, И.Р. Нарушкевичус, В.М. Дубашинский и др. // Сварочное производство. 1974. № 10. с. 14–16.

76. Лебедев В.К. Дуга переменного тока в цепи с последовательно соединенными индуктивностью и емкостью / В.К. Лебедев, А.Е. Коротынский // Автоматическая сварка. 1994 № 12. с. 47–48.

77. Sarrafi R. Cathodic Cleaning of Oxides from Aluminum Surface by Variable-Polarity Arc / R. Sarrafi, R. Kovacevic // Welding Journal. 2010. № 1. p. 1-s–10-s.

78. Лесков Г. И. Расчет длительности импульсов для первоначального и повторного возбуждения сварочной дуги переменного тока / Г.И. Лесков, В.П. Лугин // Управление сварочными процессами: сб. науч. тр. Тула. ТПИ. 1976. с. 3–7.

79. Панфилов В.А. Электрические измерения: учебник / В.А. Панфилов. — М.: Академия, 2008. — 288 с.

80. Сравнение методов оценки тепловой мощности процесса дуговой сварки / А.Е. Коротынский, Н.М. Махлин, С. И. Полосков и др. // Сварочное производство. 2005. № 3. с. 3–4.

81. Летагин И.Ю. Разработка методов оперативной оценки стабильности горения и повторного возбуждения дуги при ручной дуговой сварке: автореф. дисс. канд. техн. наук (25.06.2010) / И.Ю. Летагин (ПермГТУ). Пермь. 2010. 16 с.

82. ГОСТ 8.207-76. Прямые измерения многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения. Введен 16.03.1976, переиздан 04.2006 — М.: Стандартинформ. 2006. 7 с.

83. Раннев Г.Г. Методы и средства измерений: учебник / Г.Г. Раннев, А.П. Тарасенко. — М.: Академия, 2008. — 336 с

84. Заруба И.И. Статистические показатели стабильности при оценке сварочных свойств источников питания для дуговой сварки. / И.И. Заруба, В.П. Латанский, Н.В. Троицкая // Новые сварочные источники питания: сб. науч. тр. АН Украины, ИЭС им. Е.О.Патона. — Киев, 1992. с. 86–94.

85. Оценка сварочных свойств оборудования с инверторными источниками питания по энергетическим характеристикам / Э.А. Гладков, А.А. Юшин, Р.А. Перковский и др. // Сварка и диагностика. 2011. № 1. с. 31–35.

86. Sawicki A. Process Simulation in the AC Welding Arc Circuit Using a Cassie–Mayr Hybrid Model / A. Sawicki, L. Switon, R. Sosinski // *Welding Journal*. 2011. № 3. p. 41-s–44-s.

87. Двухмостовые сварочные выпрямители, регулируемые магнитным шунтом / А.И. Комарчев, Л.И. Сахно, О.И. Сахно и др. // *Сварочное производство*. 2001. № 1. с. 16–21.

88. Голощапов С.М. Влияние пульсаций сварочного тока на параметры процесса сварки с короткими замыканиями дугового промежутка / С.М. Голощапов, В.Р. Абрамович, Р.Ю. Воронин // *Сварочное производство*. 1978. № 3. с. 32–34

89. Патент на полезную модель РФ. RU 94889, Источник питания для электродуговой сварки /А.Г. Сивоплясов. — Подано 17.08. 2012. 11.09.2010.

90. Дюргеров Н.Г. Интегральный критерий качества саморегулирования сварочной дуги / Н. Г. Дюргеров // *Сварочное производство*. 2001. № 8. с. 8–10.

91. Сварка, пайка и термическая резка металлов: сборник ГОСТ, ч. 1–2, М.: Изд. стандартов, 1990.

92. Новые механизмы подачи электродной и присадочной проволоки / В.А. Лебедев, С.Ю. Максимов, В.Г. Пичак и др. // *Сварочное производство*. 2011. № 5. с. 35–39.

93. Лебедев В.А. Вопросы динамики системы подачи электродной проволоки / В.А. Лебедев // *Сварочное производство*. 2008. № 5. с. 10–17.

94. Лебедев В.А. Функциональные особенности электроприводов постоянного тока для сварочного оборудования/ В.А. Лебедев, С.И. Полосков, С.Д. Братчук // *Сварочное производство*. 2002. № 6. с. 34–41

95. Влияние возмущений в системе подачи электродной проволоки на качество сварных соединений / С.И. Полосков, Ю.С. Ищенко, В.А. Лебедев и др. // *Сварочное производство*. 2001. № 8. с. 3–7.

96. Методы сравнительной оценки технологических свойств сварочного оборудования и материалов / И.К. Походня, И.И. Заруба, В.Е. Пономарев и др.// *Автоматическая сварка*. 1990. № 5. с. 1–5.

97. Автоматизация сварочных процессов: учебное пособие / под ред. В.К. Лебедева и В.П. Черныша. — К.: Вища школа, 1986. — 296 с.

98. Amin M. One-knob Controlled MIG Welding Power Sources: Steady D.C. Open ARC and Short-circuiting ARC Operation : a Critical Review. Research reports AWS (Vol. 284).

99. . Попков А.М. Экстремальное регулирование при сварке с систематическими короткими замыканиями / А.М. Попков // Автоматическая сварка, 1973. № 1. с.51–53.

100. Волтерс Х. QSet — прорыв в технологии сварки короткой дугой/ Х. Волтерс, П. Оберг// Svetsaren ESAB, т. 61, с. 35–38 (русскоязычная версия).

101. Kim Y.S. Metal transfer in pulsed current gas metal arc welding / Y.S. Kim, T.W. Eagar // Welding Journal, 1993. vol.72. – No.7, p. 279–287.

102. Lesnevich A. Control of melting rate and metal transfer in gas shielded metal-arc welding. Part II . Control of metal transfer // Welding Journal. 1958, Vol. 37.–No. 9. p. 418–425.

103. Choi S.K. Dynamic Simulation of Metal Transfer in GMAW — Part 1: Globular and Spray Transfer Modes / S.K Choi., C.D. Yoo, Y.S Kim // Welding Journal. 1998, № 11, p. 38-s–44-s.

104. Choi S.K. Dynamic Simulation of Metal Transfer in GMAW — Part 2: Short-Circuit Transfer Mode / S.K Choi., C.D. Yoo, Y.S Kim// Welding Journal. 1998. № 12. p. 45-s–51-s.

105. Березовский Б.М. Математические модели дуговой сварки. Т. 1 / Б.М. Березовский. — Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2002. — 585 с.

106. Березовский Б.М. Математические модели дуговой сварки. Т. 2 / Б.М. Березовский. — Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2003. — 601 с.

107. Березовский Б.М. Математические модели дуговой сварки. Т.3 / Б.М. Березовский. — Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2003.

108. Судник В.А. Математическая модель источника теплоты при дуговой сварке плавящимся электродом в смеси защитных газов / В.А. Судник, В.А. Иванов // Сварочное производство. 1998. № 9. с. 3–9.

109. Rhee S. Observation of Metal Transfer during Gas Metal Arc Welding / S. Rhee., E. Kannatey-Asibu Jr. // Welding Journal. 1992. № 10. p. 381-s–386-s.

110. Пономарев В. Влияние капли электродного металла на напряжение дуги при сварке в защитных газах / В. Пономарев, А.В. да Коста, А. Скотти // Автоматическая сварка. 2002. № 4. с. 7–10.

111. Фрумин И.И. Автоматическая электродуговая наплавка/ И.И. Фрумин — Харьков: Металлургия, 1961. — 212 с.

112. Kim Y.S. Analysis of Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding / Y.S. Kim, T.W. Eagar // *Welding Journal*. 1993. № 6. p. 269-s–278-s.

113. Soderstrom E.J. Metal Transfer during GMAW with Thin Electrodes and Ar–CO₂ Shielding Gas Mixtures /E.J. Soderstrom, P.F. Mendez // *Welding Journal*. 2008. № 5. p. 124-s –133-s.

114. Перенос электродного металла при сварке в углекислом газе / А.Г. Потапьевский, В.С. Мечев, В.Я. Лаврищев и др. // *Автоматическая сварка*. 1971. № 6. с. 1–4.

115. Петров А.В. Перенос металла в дуге при сварке плавящимся электродом в среде защитных газов / А.В. Петров // *Автоматическая сварка*. 1955. № 2. с. 26–33.

116. Modensi P.J. Arc Instability Phenomena in GMA Welding / P.J. Modensi, J. H. Nixon // *Welding Journal*. 1994. № 9. p. 219-s–224-s.

117. Пономарев В. Особенности смешанных типов переноса металла при сварке в защитных газах длинной дугой / В. Пономарев, А. Скотти // *Автоматическая сварка*. 2005. №3. с. 8–14.

118. Букаров В.А. Оценка стабильности дуговой сварки по осциллограммам процесса с использованием статистических методов / В.А. Букаров, С.С. Ермаков, Т.А. Дорина // *Сварочное производство*. 1990. № 12. с. 31–33.

119. Лебедев А.В. Исследование управляемого переноса электродного металла при сварке в углекислом газе / А.В. Лебедев // *Автоматическая сварка*. 1991. № 3. с. 33–37.

120. Sengupta V. Effect of Current on Metal Transfer in SAW Part 1: DCEP, path 2: AC, path 3: Fluxes/ V. Sengupta and P. F. Mendez // *Welding Journal*, 2017, №7, 8, 9, p.241-s–...

121. Дюргеров Н.Г. Саморегулирование и управление процессом сварки короткой дугой / Н.Г. Дюргеров, Л.А. Соловьянюк // *Сварочное производство*. 2014. № 1. с. 3–5.

122. Kang S.K. A Mechanism of Spatter Production from the Viewpoint of the Integral of the Specific Current Action / S.K.Kang, S.J. Na // *Welding Journal*. 2005. № 12. p. 188-s–196-s.

123. Spatter Rate Estimation in the Short–Circuit Transfer Region of GMAW / M.J. Kang, Y. Kim, S. Ahna // *Welding Journal*. 2003. № 9. p. 238-s–247-s.

124. Liu S. Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding: Droplet Rate / S. Liu, T.A. Siewert // *Welding Journal*. 1989. № 2. p. 52-s–58-s.

125. Постолатий Н.И. Приближенный расчет индуктивности дросселя в сварочной цепи постоянного тока / Н.И. Постолатий // Автоматическая сварка. 2004. № 12. с. 40–47.

126. Закс М.И. Сварочные выпрямители / М.И. Закс. — Л.: Энергоатомиздат, 1983. — 94 с.

127. Павшук А.М. Взаимосвязь параметров импульсов тока при управляемом переносе электродного металла / А.М. Павшук, П.П. Шейко, И.И. Заруба // Автоматическая сварка. 1992. № 3. с. 19–25.

128. Воропай Н.М. Особенности импульсно-дуговой сварки с синергетическим управлением параметрами режима / Н.М. Воропай, В.М. Илюшенко, Ю.Н. Ланкин // Автоматическая сварка. 1999. № 6. с. 26–32.

129. Дюргеров Н.Г. Оборудование для импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом/ Н.Г. Дюргеров, Х.Н. Сагиров, В.А. Ленивкин. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 80 с.

130. Lincoln Electric Nextweld Document #NX–2.70. Pulse cycle. [Электронный ресурс] <http://www.lincolnelectric.com> Проверено 10.09.2012.

131. Сенчак В. Управление переносом металла с помощью токовых импульсов при сварке плавящимся электродом в защитных газах / В. Сенчак, П. Орсаг //Автоматическая сварка. 1991. № 1. с. 48–51.

132. Aristo U8/W8 — ESAB Catalogue Virtual-Expo logo. [Электронный ресурс] ESAB. URL: <http://www.esab.com> Проверено 10.09.2012.

133. Process: Pulse-On-Pulse GMAW (MIG) [Электронный ресурс] *Lincoln Electric*. URL:<http://www.lincolnelectric.com/assets/..NX210> Проверено 10.09.2012.

134. Лебедев В.А. Тенденции развития механизированной сварки с управляемым переносом электродного металла / В.А. Лебедев // Автоматическая сварка. 2010. № 10. с. 45–53.

135. Zhang Y.M. Modified Active Control of Metal Transfer and Pulsed GMAW of Titanium / Y.M. Zhang, P.J. Li // *Welding Journal*. 2001. № 2. p. 54-s–61-s.

136. Ленивкин В.А. Импульсно-дуговая сварка с прерывисто-струйным переносом / В.А. Ленивкин, Д.В. Киселев // Сварка и диагностика. 2014. № 3. с. 25–28.

137. Сараев Ю.Н. Управление переносом электродного металла при сварке в CO_2 с короткими замыканиями дугового промежутка / Ю.Н. Сараев // Автоматическая сварка. 1988. № 12. с. 16–23.

138. Ланкин Ю.Н. Автоматическое управление процессом сварки плавящимся электродом в CO_2 с периодическими короткими замыканиями дугового промежутка / Ю.Н. Ланкин // Автоматическая сварка. 2007. № 1. с. 2–10.

139. Симо Д.К. Регистраторы для контроля параметров процесса сварки / Д.К. Симо, А.М. Бушуев // Информ. матер. завода «Электрик», 2004. с. 29–39.

140. Управление переносом капли при сварке плавящимся электродом с короткими замыканиями дугового промежутка / С.И. Полосков, Ю.С. Ищенко, В.А. Лебедев и др. // Сварочное производство. 2001, № 6. с. 6–9.

141. Гецкин О.Б. Моделирование процесса переноса электродного металла при сварке с короткими замыканиями / О.Б. Гецкин, В.А. Ерофеев, С.И. Полосков // Автоматическая сварка. 2009. № 2. с. 16–21.

142. Атрошенко В.В. К вопросу об управлении переносом электродного металла при дуговой сварке плавящимся электродом с короткими замыканиями дугового промежутка / В.В. Атрошенко, В.Н. Тёфанов, К.А. Краев // Вестник УГАТУ. Уфа. 2008. Т. 11, № 2 (29). с. 146–154.

143. Stava E.K. Method and apparatus for electric arc welding : Пат. 754671 Австралия, МПК6 В 23 К 009/095 В 23 К 009/09 / Е.К. Stava, C. Hsu, P. Nicholson. Lincoln Global Inc. № 200155933; Заявл. 24.07.2001.

144. Stava E.K. New surface tension transfer process speed pipe welding / E.K. Stava // Pipe Line a. Gas Industry, 1999. vol. 82. № 9. p. 55–57.

145. Ууситало Ю. Новая технология сварки модифицированной короткой дугой / Ю. Ууситало, А.С. Мосягин, С.А. Линовский // Сварочное производство. 2008. № 6. с. 49–53.

146. Lorch – the way to weld Speed Root. [Электронный ресурс] / URL: <http://www.lorch-me.com/SpeedRoot.html> Проверено 10.09.2012.

147. Патент РФ. RU №2353484 C1, МПК В23К 9/95 . Способ механизированной дуговой сварки в активных газах и устройство для его осуществления / В.С. Милютин, А.А. Морозов — Опубликовано. 27.04.2009.

148. Солодский С.А. Автоматизированная система управления процессом сварки в CO_2 с импульсной подачей проволоки и модуляцией сварочного тока / С.А. Солодский, О.Г. Брунов, А.А. Зеленковский // Сварочное производство. 2010. №12. с. 26–30.

149. Патон Б.Е. Способ комбинированного управления процессом переноса электродного металла при механизированной дуговой сварке / Б.Е. Патон, В.А. Лебедев, Я.И. Микитин // Сварочное производство. 2006. №8. с. 27–32.

150. Лебедев В.А. Механизмы импульсной подачи проволоки с регулированием параметров импульсов / В.А. Лебедев, В.Г. Пичак, В.Б. Смолярко // Автоматическая сварка, 2001. № 5. с. 31–37.

151. Павлов Н.В. Детерминировано-статистическая модель формы шва / Н.В. Павлов, А.В. Крюков, Е.А. Зернин // Сварка и диагностика, 2011. № 6. с. 31–35.

152. Солодский С.А. Разработка автоматизированной системы для сварки в CO_2 с импульсной подачей проволоки и модуляцией сварочного тока: автореф. дисс. канд. техн. наук (31.03.2010) / С.А. Солодский (ЮУГУ) // Челябинск, 2010. 20 с.

153. Бондаренко В.Л. Дуговая сварка с импульсной подачей электродной проволоки — процесс СМТ, предложенный фирмой «Фрониус» / В.Л. Бондаренко // Автоматическая сварка. 2004. № 12. с. 55–58.

154. Лебедев В.А. Особенности управления процессом сварки плавящимся электродом с импульсной подачей электродной проволоки / В.А. Лебедев // Сварка и диагностика. 2014. № 1. с.15–18.

155. Лебедев В.А. Механизированная и автоматическая синергетическая сварка с импульсной подачей электродной проволоки. / В.А. Лебедев // Автоматическая сварка. 2014. № 2. с.13–19.

156. Шатило С.П. Модель переноса электродного металла при ручной дуговой сварке / С.П. Шатило, В.Д. Макаренко // Сварочное производство. 1999. № 7. с. 3–5.

157. Brandi I.S. Analysis of Metal Transfer in Shielded Metal Arc/ I.S.Brandi, C. Taniguchia, S. Liu // Welding Journal. 1991. №10. p. 261-s–270-s.

158. Пацкевич И.Р. Исследование размеров электродных капель при ручной дуговой сварке / И.Р. Пацкевич // Автоматическая сварка. 1954. № 1. с. 44–47.

159. Ерохин А.А. Основы сварки плавлением. Физико-химические закономерности / А.А. Ерохин — М.: Машиностроение, 1973. — 448 с.

160. Цыбульский Г. А. Определение структуры системы с саморегулированием скорости плавления электрода /Г.А. Цыбульский// Автоматическая сварка. 2017. №7, с 3-8

161. Критерии оценки стабильности процесса дуговой сварки на постоянном токе / И.К. Походня, И.И. Заруба, В.Е. Пономарев и др. // Автоматическая сварка. 1989. № 8. с. 1–4.

162. Ильященко Д.П. Разбрызгивание при ручной дуговой сварке покрытым электродом и способы его снижения / Д.П. Ильященко, С.Б. Сапожков // Сварочное производство, 2007. № 12. с. 28–31.

163. Ильященко Д.П. Определение потерь на разбрызгивание металла при использовании различных источников питания / Д.П. Ильященко, Е.А. Зернин // Сварочное производство. 2009. №5. с. 36–39.

164. Лаужадис А.И. Влияние параметров источников питания на разбрызгивание металла при сварке покрытыми электродами / А.И. Лаужадис, Ч.А. Казакевичус // Автоматическая сварка. 1976. № 4. с. 24–30.

165. Демянцевич В.П. Металлургические и технологические основы дуговой сварки / В.П. Демянцевич. М.–Л.: Машгиз, 1962. — 296 с.

166. Бельчук Г.А. Сварные соединения в корпусных конструкциях / Г.А. Бельчук. — Л.: Судостроение, 1969. — 279 с.

167. Лесков Г.И. К вопросу построения динамической модели сварочной ванны при электродуговой сварке / Г.И. Лесков, С.В. Пустовойт // Автоматическая сварка. 2001. № 1. с. 11–15.

168. Математическая модель процесса сварки под флюсом и явлений в дуговой каверне / В.А. Судник, А.В. Масленников, Д.В. Слезкин и др. // Сварочное производство. 2012. № 7. с. 3–12.

169. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке / Н.Н. Рыкалин. — М.: Машгиз, 1951. — 296 с.

170. Теория сварочных процессов: учебник / под ред. В.М. Неровного // Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. — 752 с.

171. Лебедев В.А. Управление проплавлением при механизированной сварке и наплавке / В.А. Лебедев // Автоматическая сварка. 2011. № 1. с. 3–11.

172. Лебедев В.А. Управление геометрией сварного шва аппаратными средствами при механизированной и автоматической сварке плавающим электродом / В.А. Лебедев, С.Ю. Максимов, Ю.Н. Сараев // Сварочное производство. 2014. № 5. с. 10–16.

173. Столбов В.И. Сварочная ванна / В.И. Столбов. — Тольятти : ТГУ, 2007. — 147 с.

174. Березовский Б.М. Математическое моделирование и оптимизация формирования швов при дуговой сварке в различных простран-

ственных положениях: автореф. дисс. докт. техн. наук (30.10.1996) / Б.М. Березовский (ЧГТУ). Челябинск, 1996. 40 с.

175. Деев Г.Ф. Дефекты сварных швов / Г.Ф. Деев, И.Р. Пацкевич // — Киев: Наукова думка. 1984. — 208 с.

176. Перковский Р.А. Разработка физико–математических моделей и микропроцессорных систем контроля и управления процессом аргонодуговой сварки тонкостенных изделий ответственного назначения: автореф. дис. канд. техн. наук (23.09.2010) / Р.А. Перковский; (МГТУ), Москва, 2010.

177. Металлургия дуговой сварки: Взаимодействие металла с газами / И.К. Походня, И.Р. Явдошин, А.П. Пальцевич и др.; Под ред. И.К. Походни; Ин-т электросварки им. Е.О. Патона. — К.: Наукова думка, 2004. — 445 с.

178. Князьков В.Л. Повышение эффективности ручной дуговой сварки трубопроводов / В.Л. Князьков, А.Ф. Князьков. — Кемерово: ГУ КузГТУ, 2008. — 104 с.

179. Оценка квалификации сварщика с помощью цифровых технологий / В.В. Панков, В.М. Букин, С.В. Панков и др. // Сварка и диагностика. 2012. № 6. с. 54–58.

180. Liu Y.K. Skilled human welder intelligence modeling and control: Part II — Analysis and control applications / Y.K. Liu, Y.M. Chang, L. Kvidahl // Welding Journal. 2014. № 5. p. 162-s–170-s.

181. Милютин В.С. Оценка стабильности режима при испытании источников питания для ручной дуговой сварки / В.С. Милютин, Р.Ф. Катаев, А.В. Полухин // Сварка и диагностика. 2014. № 3. с. 32–37.

182. РД 03-495-02. Технологический регламент проведения аттестации сварщиков и специалистов сварочного производства. Госгортехнадзор России. 2002. 81 с.

183. Сварка, пайка и термическая резка металлов: сборник ГОСТ, ч. 1–2, М.: Изд. стандартов, 1990.

184. Дедюх Р.Е. Повышение эффективности дуговой сварки покрытыми электродами в разных пространственных положениях модулированием тока: автореф. дисс. канд. техн. наук (18.05.1982) / Р.Е. Дедюх (МИНГ) // — Москва 1982. 20 с.

185. Мазель А.Г. Влияние параметров модулированного тока на процесс расплавления электрода и глубину проплавления при ручной дуговой сварке / А.Г. Мазель, Р.И. Дедюх // Сварочное производство. 1976. № 4. с. 9–10.

186. Походня И.К. Влияние режимов сварки под флюсом пульсирующей дугой на глубину проплавления основного металла / И.К. Походня, В.В. Головкин, П.П. Шейко // Автоматическая сварка. 1996. № 5. с. 1–7.

187. Князьков А.Ф. Исследование сварочно-технологических свойств покрытых электродов при сварке модулированным током / А.Ф. Князьков, К.И. Деменцев, В.Л. Князьков // Сварочное производство. 2011. № 10. с.15–18.

188. Лапин И.Е. Повышение технологических свойств дуги при сварке неплавящимся электродом в инертных газах: автореф. дисс. докт. техн. наук (18.11.2004) / И.Е. Лапин (ВолГТУ). Волгоград, 2004. 40 с.

189. Система Динамического Оксидного Контроля. [Электронный ресурс] URL: <http://www.weldingsite.com.ua/equipn15.html> Проверено 10.09.2012.

190. Система автоматической сварки под флюсом Power Wave AC/DC 1000. Проспект фирмы Lincoln Electric. 2010

191. Система оперативного контроля качества сварочного оборудования в процессе его промышленного производства / Б.Е. Патон, А.Е. Коротынский, М.И. Скопюк и др. // Автоматическая сварка. 2002. № 5. с. 29–33.

192. Измеритель статических ВАХ сварочных источников AWS-024 / Э.А. Гладков, Р.А. Перковский, К.В. Гусев и др. // Сварочное производство. 2004. № 3. с. 37.

193. Сравнительные испытания сварочно-технологических свойств инверторных и тиристорных источников питания / В.М. Илюшенко, Г.А. Бутаков, В.М. Ганчук и др. // Автоматическая сварка. 2009. № 4. с. 42–45.

194. Патон Б.Е. Программируемый интерфейс MacLab для создания информационно-измерительных систем в области сварки / Б.Е. Патон, А.Е. Коротынский, М.И. Скопюк // Biuletyn Instytutu Spawalnictwa. 1997. № 3. s.27–30 (русскоязычный вариант).

195. Sawicki A. Process Simulation in the AC Welding Arc Circuit Using a Cassie–Mayr Hybrid Model / A. Sawicki, L. Switon, R. Sosinski // Welding Journal. 2011. № 3. p. 41–s–44-s.

196. Chu Y.X. Signature analysis for quality monitoring in short-circuit GMAW / Y.X. Chu, S.J. Hu, W.K. Hou // Welding Journal. 2004. № 12. p. 336–s–342-s.

197. Adam G. Sensing of GMAW Droplet Transfer Modes Using an ER100S-1 Electrode / G. Adam, T.A. Siewert // Welding Journal. 1990. № 3 p. 103-s–108-s.

198. Методика оценки стабильности горения сварочной дуги / В.М. Язовских, В.Я. Бельный, Л.Н. Кротов и др. // Сварочное производство. 1997. № 4. с.18–20.

199. Язовских В.М. Экспресс-методы оценки качества сварочных электродов / В.М. Язовских, Е.А. Кривоносова, В.И. Шумяков // Сварочное производство. 1998. № 5. с. 26–30.

200. Чернов А.В. Обработка информации в системах контроля и управления сварочным производством / А.В. Чернов. — Новочеркасск: Новочерк. госуд. техн. унив., 1995. — 180 с.

201. Выбор методов комплексной оценки качества сварочного оборудования / Л.М. Лобанов, А.Е. Коротынский, В.И. Юматов и др. // Автоматическая сварка. 2004. № 9. с. 37–39.

202. Шевченко Н.В. Методика оценки сварочных свойств источников питания для дуговой сварки / Н.В. Шевченко, И.О. Скачков, В.Е. Пономарев // Автоматическая сварка. 2011. № 4. с. 50–53.

203. Бекетов В.Г. Информационно-измерительная система для аттестации источников дуговой сварки: автореф. дис. канд. техн. наук (30.11.2006) / В.Г. Бекетов (Волгогр.ГТУ); — Волгоград. 2006. — 30 с.

204. Марковская модель процесса ручной дуговой сварки / А.В. Сас, О.В. Ульянова, А.В. Чернов и др. // Сварочное производство. 2006. № 8. с. 14–17.

205. Юшин А.А. Разработка критериев оценки сварочных свойств установок для дуговой сварки с управляемым каплепереносом: автореф. дис. канд. техн. наук (15.03.2012)/ А.А. Юшин (МГТУ); —Москва, 2012. — 16 с.

206. Mendez P. F. High-Speed Video of Metal Transfer in Submerged Arc Welding / P. F. Mendez, G. Goett, S. D. Guest //Welding Journal. 2015. №10. p. 328-s – 333-s.

207. Ленивкин В.А. Энергетический баланс процесса сварки короткой дугой / В.А. Ленивкин, Н.Г.Дюргеров , Г.В. Даровской // Сварка и диагностика. 2016. №4, с.32-35 📄

208. Дюргеров Н.Г. Технологическая стабильность импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом /Н.Г. Дюргеров, В.А. Ленивкин //Сварочное производство. 2015. №2. с. 3-7.

209. Дюргеров Н.Г. Разновидности процессов импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом в защитных газах /Н.Г. Дюргеров, В.А. Ленинкин // Сварка и диагностика. 2015. №5. с. 39-42
210. Allum C. J. Metal transfer in arc welding as a varicose instability. P. 1. Varicose instability in a current-carrying liquid cylinder with surface charge / C. J. Allum // J.Phys. D: Appl. Phys. 1985. №7. p. 14 - 31
211. Семенов А. П. Методы математического моделирования процессов формирования и переноса капель электродного металла при сварке плавящимся электродом (Обзор), А. П. Семенов// Автоматическая сварка. 2014. №10. с. 3-12
212. Махлин Н.М. Совершенствование сварочных источников питания для повышения устойчивости горения дуги переменного тока / Н.М. Махлин // Автоматическая сварка. 2016. №8. с. 47-57
213. Махлин Н.М. Совершенствование электронных устройств для первоначального и повторных возбуждений дуги переменного тока / Н.М. Махлин // Автоматическая сварка. 2016. №4. с. 47-52
214. Цыбульский Г.А. О влиянии параметров сварочной цепи на формирование импульсов сварочного тока / Г.А. Цыбульский // Автоматическая сварка. 2016. №9. с. 16–19
215. Опыт разработки и применения современных отечественных технологий и оборудования для автоматической орбитальной сварки магистральных газопроводов / О. Б. Гецкин, Е. М. Вышемирский, А. В. Шипилов, С. И. Полосков // Сварка и диагностика. 2010, №6. с. 51-57
216. Особенности управляемого тепломассопереноса при сварке плавящимся электродом с короткими замыканиями дугового промежутка / С.И. Полосков, Ю.С. Ищенко, В.А. Лебедев, О.Б. Гецкин // Сварочное производство. 2002. № 7.
217. Справочник по орбитальной ВИГ-сварке - POLYSOUDE www.polysoude.ru / Электронный ресурс. Проверено 10.01. 2017
218. СТО-ГК «Трансстрой»-012-2007. Стандарт организации. Стальные конструкции мостов. Заводское изготовление. М., 2007–264 с.
219. СНиП 3.03.01-87. Несущие и ограждающие конструкции. Утверждены постановлением Государственного строительного комитета СССР от 4 декабря 1987 г. № 280. – 138 с.
220. Махлин Н.М. Особенности бесконтактных возбуждений дуги переменного тока / Н.М. Махлин // Автоматическая сварка, 2015. № 10, с. 30–37
221. Babkin A.S. Identification of Welding Parameters for Quality Welds in GMAW /A.S. Babkin, E.A. Gladkov// Welding Journal, 2016, №1, p. 37-s–48-s.

222. Pan J. Arc welding control, Jiluan Pan, Woodhead Publishing Limited, Cambridge. England. 2003. – 604 p.
223. Lebedev V.K. On technological (welding) properties of power sources for arc welding / V.K. Lebedev, I.I. Zaruba, A.I. Lauzhadis // ПВ Doc XIIF-216-80
224. Сараев Ю. Н. Исследование стабильности плавления и переноса электродного металла в процессе дуговой сварки плавящимся электродом от источников питания с различными динамическими характеристиками /Ю.Н. Сараев, Д.А. Чинахов, Д.П. Ильященко и др.// Сварочное производство, 2016 №12 с. 1–9.
225. Дюргеров Н. Г. Интегральное саморегулирование в процессах дуговой сварки/ Н.Г. Дюргеров, И.С. Морозкин, В.А. Ленивкин // Сварочное производство, 2016. №10. с. 13–16
226. Лебедев В.А. Современное механизированное оборудование для сварки и наплавки и его технико-технологические возможности /В.А. Лебедев, С.Ю. Максимов//Киев. Основа. 2012. – 390 с.
227. Милютин В.С. Оценка устойчивости процесса при испытании источников питания для ручной дуговой сварки / В.С. Милютин, А.В. Полухин // Сварка и диагностика. 2012. № 6, с. 30–35.
228. Варуха Е.Н. Причины образования неустойчивости процесса сварки в защитных газах с короткими замыканиями дугового промежутка. / Е.Н. Варуха// Сварка и диагностика. 2017, №3, с. 20-23
229. Лебедев В.А. Механизированная дуговая сварка в CO₂ с регулируемой импульсной подачей электродной проволоки/ В.А. Лебедев, В.Г. Пичак // Сварочное производство. 1998. № 5. с. 30–33.
230. Spray-Modal - инновации в технологии MIG - Сварочные технологии [Электронный ресурс] <https://www.svartools.ru> Проверено 25.01.2018.
231. Welding Handbook [Электронный ресурс] <https://www.millerwelds.com/welding-resources> Проверено 25.01.2018
232. Федюкин С.В. Новое поколение импортозамещающих сварочных установок / С.В. Федюкин, М.В. Карасев, С.В. Карасев и др. //Сварка и диагностика. 2017. № 5, с. 49-54.
233. Дюргеров Н.Г. Устойчивость системы саморегулирования сварочной дуги/ Н.Г. Дюргеров, Г.В. Даровский, К.В. Шеховцев // Сварка и диагностика. 2017, № 6, с. 36-38.
234. Ланкин Ю. Н. Влияние электрических параметров дуговой наплавки порошковой проволокой на стабильность процесса и проплавление основного металла / Ю.Н. Ланкин, И.А.Рябцев, В.Г. Соловьев и др.// Автоматическая сварка, 2014, №9, с. 27-31.

235. Сливинский А.А. Теплофизические особенности импульсно-дуговой сварки неплавящимся электродом в защитных газах (Обзор) / А.А. Сливинский, Л.А. Жданов, В.В. Коротенко // Автоматическая сварка, 2015. №11 с. 32-38 236. ГОСТ Р ИСО 5817-2009 Сварка. Сварные соединения из стали, никеля, титана и их сплавов, полученные сваркой плавлением (исключая лучевые способы сварки). Уровни качества [Электронный ресурс] www.internet-law.ru/gosts/gost/50437/ Проверено 15.10.2018.

237. ГОСТ Р ИСО 6520-1-2012. Сварка и родственные процессы. Классификация дефектов геометрии и сплошности в металлических материалах. Часть 1. Сварка плавлением [Электронный ресурс] www.internet-law.ru/gosts/gost/54500/ Проверено 15.10.2018.

238. Патон Б.Е. История возникновения и развития теории саморегулирования дуги при сварке плавящимся электродом. Критический анализ существующих представлений / Б.Е. Патон, В.С. Сидорук, С.Ю. Максимов и др. // Сварочное производство, 2018, №6, с. 2-13.

239. Варуха Е.Н. Определение границ областей устойчивого процесса сварки с короткими замыканиями в углекислом газе / Е.Н. Варуха // Сварка и диагностика, 2018, №1, с. 41 - 47

ПРИЛОЖЕНИЕ

Товарные знаки и специальные процессы ведущих производителей сварочного оборудования

Active Arc — аргодуговая сварка с высокочастотной составляющей тока, обеспечивающей сильное контрагирование дуги, высокую плотность тепловложения в изделие и глубокое проплавление (*EWM*, Германия).

AC Pulsed MIG — механизированная сварка с управляемым переносом за счет разнополярных импульсов с целью снижения тепловложения в основной металл малой толщины и устранения магнитного дутья (Япония).

Arc Plus — устройство пассивной стабилизации дуги, устраняющее провалы тока после короткого замыкания капель при ручной сварке (*ESAB*, Швеция) — разд. 4.6.2.

CMT (Cold Metal Transfer) — система гибкого программного управления переносом «холодного» металла с реверсированием подачи (*Fronius*, Австрия) — разд. 8.5.3.

Cold Arc — сварка с технологическими короткими замыканиями тонких листов и металла с легкоплавким покрытием «холодной дугой», при которой малое тепловложение в изделие достигается снижением мощности источника после восстановления дуги (*EWM*, Германия).

Cold MIG — сварка короткой дугой (20-140 А, 13,5-20 В, 0,7-5 м/мин) благодаря использованию инверторного источника и МП-регулятора в сравнении с обычной сваркой короткой дугой характеризуется более крутым подъемом и спадом тока короткого замыкания и высокой регулярностью переноса капель, что приводит к снижению на 20-30 % тепловложения в изделие и позволяет называть сварочный процесс «холодным» (*Merkle*, Германия).

Cold Weld — «холодный» процесс обеспечивает периодическую смену полярности дуги после сбрасывания очередной капли для перераспределения теплоты между ванной и электродом (*Cloos*, Германия) — разд. 8.4.1.

Deep Arc — процесс с глубоким погружением в сварочную ванну дуги, сфокусированной за счет высокочастотной составляющей напряжения источника (*Merkle*, Германия).

D.O.C. (Dynamic Oxide Control) — система гибкого управления тактом прямой полярности в зависимости от окисленности поверхности заготовок при аргонодуговой сварке алюминия (*Migatronic*, Дания) — разд. 10.4.5.

Focus Arc — процесс MIG/MAG-сварки сфокусированной дугой обеспечивает направленный перенос, низкое разбрызгивание и глубокое проплавление как короткой, так и струйной дугой, к тому же с сокращением области переходного между ними интервала (*Rehm*, Германия).

Force Arc — форсирование дуги с целью повышения устойчивости при сварке струйной дугой, погруженной в сварочную ванну (*EWM*, Германия) — разд. 8.2.1.

Gas Guard — устройство, запрещающее начало сварки при не-включенной подаче газа (*Kemppi*, Финляндия).

High Up — процесс позволяет сочетать при выполнении одного шва практически любое количество чередующихся импульсов базовых алгоритмов (*Deep Arc*, *Cold MIG*, *MIG/MAG*, *Pulse Arc*, *Interpulse*) с различными характеристиками: длительностью, силой тока, напряжением, (*Merkle*, Германия).

HPS (High Penetration Speed) — MIG-процесс, сочетающий высокий ток и низкое напряжение с точной настройкой динамических характеристик, что способствует глубокому проплавлению при высокой скорости сварки и низкому тепловложению в изделие (*Oerlikon*, Германия).

Impuls — импульсно-дуговая сварка с предупреждением случайных коротких замыканий, рекомендуется на режимах с переходным видом переноса (*EWM*, Германия).

Inter Pulse — процесс MIG-сварки с двойным модулированием тока, в котором редкие импульсы используют для управления формированием шва, а более частые — для управления переносом, рекомендуется

для соединения алюминиевых сплавов и высоколегированных сталей (*Merkle*, Германия).

Lift Arc — система зажигания дуги отрывом электрода от изделия с мягким пуском при аргонодуговой сварке (*ESAB*, Швеция) – разд. 1.4.2.

Live TIG — система мягкого пуска при аргонодуговой сварке с плавным нарастанием тока от 12-20 А повышает жизнестойкость электрода при аргонодуговой сварке (*ESAB*, Швеция).

LSC (Low Spatter Control) — MIG/MAG-сварка короткой дугой, в которой короткое замыкание, в отличие от стандартной короткой дуги, происходит при относительно низкой силе тока, что и способствует значительному снижению разбрызгивания (*Fronius*, Австрия).

Microtack — TIG-прихватка на больших токах (более 200 А) и малых длительностях (1–200 мс), прецизионно точная по размерам сварной точки (*Kemppi*, Финляндия).

Microstart — вспомогательный выпрямитель подпитки на 2 А, подключаемый параллельно тиристорному выпрямителю, заполняет провалы тока, чем способствует мягкому пуску, устойчивому процессу и заварке кратера (*Lincoln Electric*, США) — разд. 1.4.2.

Minilog — предварительная настройка двух режимов позволяет при сварке переходить от одного режима к другому без остановки процесса (*Kemppi*, Финляндия) — разд. 7.3.4.

Mixtig — сочетание этапов переменного и постоянного тока при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом (*Kemppi*, Финляндия).

Pipe Root — комплекс компьютерных программ для управления переносом с короткими замыканиями при сварке корневого прохода трубопровода (*Kemppi*, Финляндия).

PMC (Pulse Multi Control) — импульсно-дуговая MIG/MAG-сварка с гибким управлением параметрами импульсов, у которой в отличие от жесткого программного управления благодаря действию обратных связей обеспечивается быстрое реагирование на изменения условий сварки,

например в ответ на колебания вылета изменяется скорость подачи (*Fronius*, Австрия).

Power Mode — стабилизация мощности дуги за счет гиперболической формы внешней характеристики источника (*Lincoln Electric*, США).

Power Wave AC/DC — раздельное регулирование тока прямой и обратной полярности при сварке мощной дугой под флюсом для перераспределения тепловложения в электрод и изделие. (*Lincoln Electric*, США) — разд. 10.4.5.

Pro-Pulse — процесс MIG/MAG-сварки струйной пульсирующей дугой с жестким программным управлением, при котором токи и длительности импульсов и пауз соответственно сопоставимы, что способствует сужению и пространственной стабилизации дуги, особенно в положениях, отличных от нижнего (*Miller Electric*, США).

Pulse Arc — программирование 35 параметров сварочного цикла привело к разработке 144 (к 2015 г) алгоритмов синергетического управления импульсной сварки, хранящихся в памяти МП-системы каждого полуавтомата, причем выбор конкретного алгоритма задается сочетанием трех параметров (тип свариваемого металла, диаметр электродной проволоки, тип защитного газа) (*Merkle*, Германия).

Pulse-on-Pulse — система двойного модулирования при сварке алюминия плавящимся электродом, кроме управления капельным переносом выполняет еще и функцию очистки металла от оксидов (*Lincoln Electric*, США) — разд. 8.4.1.

QSet (Quick Setting) — экстремальная система управления для автоматической настройки режима MIG/MAG (*ESAB*, Швеция) — разд. 7.2.2.

Q-START (Quick Start) — при TIG-сварке с мягким пуском серия регулируемых импульсов (0,1-10 с) создает движение расплавленного металла вдоль свариваемых кромок для ускорения получения соединения (прихватки) (*Cloos*, Германия).

Quick Arc — система начального зажигания при механизированной сварке, рекомендуемая при выполнении прихваток (*Kemppi*, Финляндия)

QWave — метод аргонодуговой сварки на переменном токе, обеспечивающий высокую устойчивость и низкий уровень шума (*ESAB*, Швеция).

Rapid Arc — скоростная сварка тонколистового металла (до 2,5 м/мин) короткой дугой с ограничениями тока короткого замыкания в момент переноса капель (*Lincoln Electric*, США).

RMD (Regulated Metal Deposition) — процесс MIG/MAG-сварки короткой дугой с гибким программным управлением переносом, при котором на стадии короткого замыкания капель ток стабилизируется, а в последующей дуговой стадии снижается в три ступени до сравнительно малой величины, что гарантирует регулярность переноса, высокую устойчивость процесса и малое разбрызгивание металла (*Miller Electric*, США).

Root Arc — сварка «мягкой» короткой дугой корневого прохода при монтаже трубопровода, в том числе по большому зазору, при которой управление переносом заключается в резком снижении тока в конце короткого замыкания капель и последующем кратковременном увеличении тока для восстановления дуги (*EWM*, Германия).

SAT (Swift Arc Transfer) — скоростной перенос (струйный и вращательно-струйный) обеспечивает высокую производительность MAG-сварки благодаря высокой скорости подачи (до 18–35 м/мин для проволоки диаметром 1,2–0,8 мм соответственно), а также благодаря использованию неомедненной проволоки со специальной финишной обработкой поверхности, снижающей стружкообразование при подаче (*ESAB*, Швеция).

SFI (Spatter-Free Ignition) — зажигание при сварке плавящимся электродом в защитном газе за счет реагирования на короткое замыкание быстрым отдергиванием электрода и установлением дуги, что значительно сокращает количество брызг в начале шва (*Fronius*, Австрия)

Speed Arc — высокопроизводительный процесс сварки со струйным переносом металла короткой дугой с высокой плотностью энергии, который за счет более эффективного использования энергии дуги до-

пускает увеличение скорости сварки до 30 % в сравнении с обычной сваркой *MIG/MAG* (*Lorch*, Германия).

Speed Pulse — метод импульсно-дуговой сварки с двойным модулированием тока, в котором во время пауз между импульсами коротко-временно включаются дополнительные импульсы, обеспечивая тем самым почти непрерывный перенос: капельный — в импульсах, струйный — в паузах (*Lorch*, Германия).

Speed Root — система *MAG*-сварки, согласованно с волнообразными движениями ванны ограничивающая ток в момент опускания капли, что приводит к ее втягиванию в ванну и способствует успокоению ванны и формированию ровного корневого валика (*Lorch*, Германия) — разд. 8.4.2.

Speed Up — высокопроизводительный процесс сварки *MIG/MAG* в вертикальном и потолочном положениях с модулированием тока для управления формированием ванны, не допускающим ее стекания (*Lorch*, Германия).

Speed Weld — скоростная сварка со стабильным глубоким проплавлением обеспечивается сфокусированной пульсирующей дугой с управляемой мощностью плавления (*Cloos*, Германия).

SP-MAG (*Super imPosition* — наложение) — специализированный процесс сварки короткой дугой с управлением формой импульса сварочного тока (Япония).

Spray Modal — процесс *MIG*-сварки со струйным переносом с низкочастотным модулированием тока (30-50 Гц, 10-25 мс), при котором резонансные колебания сварочной ванны приводят к усиленной дегазации расплавленного металла, что в частности приводит к резкому снижению растворенного водорода и количества пор при сварке алюминиевых сплавов (*Oerlikon*, Германия).

SSA (*Speed Short Arc*) — процесс *MIG/MAG*-сварки с расширенной областью режимов короткой дуги благодаря резкому ускорению электрических переходных процессов при переносе капель электродного металла (*Oerlikon*, Германия).

SSP (Soft Silence Pulse) — MIG/MAG-процесс, у которого благодаря особой форме импульсов достигается хорошее смачивание ванной кромок свариваемых деталей и увеличивается глубина проплавления, а также на 50 % снижается шум дуги (*Oerlikon*, Германия).

Steel Root — в интегрированном пакете *Steel Transfer Technology*, включающем этапы надежного установления процесса, управляемого переноса и аккуратного завершения сварки стальных изделий, система, специализированная на выполнении корневого шва, в том числе по большому зазору (*Fronius*, Австрия).

Steel Dynamic — в интегрированном пакете *Steel Transfer Technology* система, специализированная на выполнении импульсного управления переносом при сварке погруженной дугой на высокой скорости (*Fronius*, Австрия).

STT (Square Tension Transfer) — система гибкого программного управления переносом за счет сил поверхностного натяжения расплавленного металла в контакте капли с ванной (*Lincoln Electric*, США) — разд. 8.4.2.

Super Puls — ручное или автоматическое переключение EWM-программ управления переносом (при сварке трубопроводов *Root Arc* для корневого прохода и *Impuls* — для заполняющих) (*EWM*, Германия).

Super Pulse — комбинированная система управления при сварке в защитных газах: переносом — со средней частотой импульсов и формированием шва — с низкой частотой (*ESAB*, Швеция) — разд. 8.4.1.

Super Snake — вспомогательный тянущий привод подачи электродной проволоки, позволяет увеличить общую длину подачи проволоки до 30 м (*Kemppi*, Финляндия).

Synchro Pulse — сварка плавящимся электродом в инертном газе с пульсирующей подачей электродной проволоки (до ± 2 м/мин, 0,5–5 Гц), рекомендуется при соединении алюминия для получения мелкошершавой поверхности шва (*Fronius*, Австрия)

T.E.D.A.C. (Torch Energy Display and Control) — система дистанционного управления процессом механизированной сварки с помощью multifunctional потенциометра и миниатюрного дисплея,

встроенных непосредственно в корпус горелки (*Merkle*, Германия) — разд. 7.2.2.

T.I.M.E. (Transferred Ionized Molten Energy) — производительный MAG-процесс, использующий высокотеплоемкую газовую смесь (Канада) — разд. 8.1.2.

True AC Rating — истинное значение переменного тока определяется независимо от индуктивности сварочной цепи (*ESAB*, Швеция).

True Arc Voltage — вычисление истинного значения сварочного напряжения при сварке в защитных газах, т.е. независимого от сопротивления внешней цепи и длины сварочных проводов (*ESAB*, Швеция).

True Energy — вычисление интегрального значения энергии при импульсных процессах, а при введении фактической длины шва — также вычисление погонной энергии сварки (*Lincoln Electric*, США).

Vari Weld — процесс MIG-сварки алюминия с капельным переносом и с пульсирующей дугой, регулируемой по току, способствует ограничению разбрызгивания электродного и снижению нагрева основного металла, рекомендуется также для MIG-пайки (*Cloos*, Германия).

VRD (Voltage Reduction Device) — устройство снижения напряжения холостого хода для уменьшения опасности поражения сварщика электрическим током (*Lincoln Electric*, США) — разд. 1.4.5.

Wave Designer — предоставляется возможность самому пользователю проектировать разные формы импульсов с помощью придаваемой программы (*Lincoln Electric*, США) — разд. 8.4.1.

Waveform Control — управление формой тока при импульсно-дуговой сварке (*Lincoln Electric*, США) — разд. 8.4.1.

Weld Point — система дистанционного контроля параметров режима сварки с выводом до 10 режимов на компьютер технолога (*ESAB*, Швеция).

Wise Fusion — система с дугой, сфокусированной за счет особой формы импульсов, дает возможность точно направлять переносимые

капли по оси электрода и концентрировать плавление основного металла, что особенно востребовано при сварке в положениях, отличных от нижнего (*Kemppi*, Финляндия).

Wise Penetration — система стабилизации тока с воздействием на скорость подачи, вступающая в действие вместо системы саморегулирования и этим гарантирующая поддержание постоянной глубины проплавления в тех случаях, когда стандартный процесс не обеспечивает полного проплавления, например из-за колебаний вылета электрода (*Kemppi*, Финляндия).

Wise Root — скоростная сварка с гибким программным управлением переносом, адаптированная к выполнению корневого прохода, в частности при сварке неповоротного стыкового шва трубопровода (*Kemppi*, Финляндия) — разд. 8.4.2.

Wise Steel — система, рекомендуемая при MIG-сварке стальной проволокой, с программным чередованием стадий переноса с короткой дугой и струйного, что обеспечивает перенос капель с незначительным разбрызгиванием и формирование шва с мелкочешуйчатой поверхностью, в частности в вертикальном и потолочном положениях (*Kemppi*, Финляндия).

Wise Thin — специализированный процесс сварки тонкого металла короткой дугой, который позволяет снизить тепловложение в изделие на 5–25 % за счет сокращения стадии дугового разряда (*Kemppi*, Финляндия).

Эти и другие разработки ведущих производителей сварочного оборудования представлены в фирменных справочных материалах для потребителей: информационный сборник *Next Weld* фирмы *Lincoln Electric* (<http://www.lincolnelectric.com>), корпоративный журнал *Svetsaren* фирмы *ESAB* (<http://www.esab.com>), журнал для клиентов *Kemppi Pro News* (<http://www.kemppi.com>).

СОДЕРЖАНИЕ

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ	3
ВВЕДЕНИЕ	5
1. НАЧАЛЬНОЕ ЗАЖИГАНИЕ ДУГИ КОРОТКИМ ЗАМЫКАНИЕМ	25
1.1. Феноменология зажигания коротким замыканием.	25
1.2. Непосредственные критерии зажигания коротким замыканием.	29
1.3. Косвенные критерии зажигания коротким замыканием.	37
1.4. Специальные функции для повышения надежности зажигания.	42
2. УСТАНОВЛЕНИЕ ДУГОВОГО ПРОЦЕССА ПРИ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ И АВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРКЕ	60
2.1. Феноменология установления процесса дуговой сварки	60
2.2. Непосредственные критерии установления процесса.	68
2.3. Косвенные критерии установления процесса.	72
2.4. Специальные функции для улучшения установления процесса.	83
3. НАЧАЛЬНОЕ ЗАЖИГАНИЕ ДУГИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫМ РАЗРЯДОМ	92
3.1. Феноменология зажигания высоковольтным разрядом.	92
3.2. Непосредственные критерии зажигания высоковольтным разрядом.	97
3.3. Косвенные критерии зажигания высоковольтным разрядом.	103
3.4. Конструкции и характеристики высоковольтных источников	107
4. УСТОЙЧИВОСТЬ ПРОЦЕССА СВАРКИ НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ	114
4.1. Феноменология устойчивого дугового процесса на постоянном токе.	114
4.2. Непосредственные критерии устойчивости на постоянном токе.	118..
4.3. Косвенные критерии устойчивости на постоянном токе	129.
4.4. Устойчивость при значительном удлинении дуги.	139
4.5. Устойчивость при механизированной сварке с технологическими короткими замыканиями.	151
4.6. Устойчивость при ручной сварке с технологическими короткими замыканиями	163
4.7. Внешние характеристики источников с позиций обеспечения устойчивости	168
5. УСТОЙЧИВОСТЬ ПРОЦЕССА СВАРКИ НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ	178
5.1. Феноменология устойчивого дугового процесса на переменном токе	178
5.2. Непосредственные критерии устойчивости на переменном токе.	180
5.3. Косвенные критерии устойчивости на переменном токе.	186
5.4. Включение конденсатора в сварочную цепь.	193
5.5. Импульсная стабилизация при сварке плавящимся электродом.	196
5.6. Устойчивость процесса аргонодуговой сварки на переменном токе.	200
6. СТАБИЛЬНОСТЬ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА	208
6.1. Понятие стабильности режима.	208
6.2. Критерии стабильности режима.	215
6.3. Регулярные пульсации сварочного тока и напряжения.	222
6.4. Нерегулярные колебания сварочного тока и напряжения.	230

6.5. Стабильность и другие характеристики механизмов подачи и перемещения.	238
7. НАСТРОЙКА И АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМОМ СВАРКИ	249
7.1. Общие принципы настройки режима.	249
7.2. Автоматическое управление сварочным оборудованием.	254
7.3. Программное управление режимом сварки.	262
7.4. Оформление панели управления сварочной установки.	277
8. ПЕРЕНОС ЭЛЕКТРОДНОГО МЕТАЛЛА ПРИ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ И АВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРКЕ	281
8.1. Феноменология процесса переноса при механизированной и автоматической сварке.	281
8.2. Непосредственные критерии переноса при механизированной и автоматической сварке.	292
8.3. Косвенные критерии переноса при механизированной и автоматической сварке.	313
8.4. Управление переносом с помощью импульсного источника.	318
8.5. Управление переносом с помощью импульсного привода подачи.	329
9. ПЕРЕНОС ЭЛЕКТРОДНОГО МЕТАЛЛА ПРИ РУЧНОЙ СВАРКЕ	337
9.1. Феноменология процесса переноса при ручной сварке.	337
9.2. Непосредственные критерии переноса при ручной сварке.	342
9.3. Косвенные критерии переноса при ручной сварке.	359
9.4. Управление переносом при ручной сварке.	362
10. ФОРМИРОВАНИЕ СВАРНОГО ШВА	365
10.1. Феноменология образования сварочной ванны и шва.	365
10.2. Стабилизация геометрических параметров шва.	378
10.3. Контрольные сварные соединения. (КСС)	383
10.4. Управление формированием шва.	391
11. АВТОМАТИЗАЦИЯ ИСПЫТАНИЙ СВАРОЧНЫХ СВОЙСТВ	406
11.1. Сварочное оборудование как объект автоматического контроля.	406
11.2. Автоматизация электротехнического эксперимента.	408
11.3. Автоматизированная регистрация экспериментальных данных.	410
11.4. Автоматизированная обработка массивов экспериментальных данных.	414
11.5. Комплексная оценка сварочных свойств.	420
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	432
ЛИТЕРАТУРА	435
ПРИЛОЖЕНИЕ	455
СОДЕРЖАНИЕ	464

